

**Treball de fi de Grau**

**Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**



# **Anàlisi del tren de potència d'un turisme amb propulsió elèctrica**

**Autor: Jaume Pugès Triguero**

**Tutor: Lluís Roger Casals**

**Barcelona, setembre 2016**

**UPC**

## Agraïments

Voldria donar les gràcies a totes les persones que m'han ajudat durant la realització d'aquest treball de fi de Grau.

En primer lloc, voldria agrair al tutor del treball, en Lluís Roger i Casals pel suport rebut.

També voldria donar les gràcies a la meva família, especialment als meus pares, pel recolzament moral durant tot aquest temps.

A tots als qui m'heu ajudat, gràcies. Aquest treball no hauria estat possible sense vosaltres.

# Índex

<b>Nomenclatura .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Introducció.....</b>	<b>4</b>
<b>2. El vehicle: aspectes generals.....</b>	<b>7</b>
2.1. Xassís i bastidor.....	7
2.2. Direcció i suspensió .....	8
2.3. Rodes .....	12
2.4. Habitacle.....	13
2.5. Espais auxiliars .....	14
2.6. Especificacions tècniques.....	14
<b>3. El vehicle elèctric: sistemes.....</b>	<b>17</b>
3.1. Emmagatzematge d'energia .....	17
3.2. Motor elèctric .....	19
3.3. Sistemes auxiliars .....	21
3.4. Electrònica de potència per als sistemes.....	21
3.5. Motor.....	22
<b>4. Estudi energètic .....</b>	<b>25</b>
4.1. Energia necessària .....	26
<b>5. Disposicions del tren de potència .....</b>	<b>29</b>
5.1. Motor i eix motriu adjacents .....	29
5.1.1. Descripció general .....	29
5.1.2. Balanç energètic .....	30
5.1.3. Dinàmica del vehicle .....	32
5.1.4. Resum de la disposició 1: motor i eix motriu adjacents .....	42
5.2. Tracció a les 4 rodes.....	43
5.2.1. Descripció general .....	43
5.2.2. Balanç energètic .....	44
5.2.3. Dinàmica del vehicle .....	45
5.2.4. Resum de la disposició 2: tracció a 4 rodes.....	53
5.3. Motor a roda.....	54
5.3.1. Descripció general .....	54

5.3.2. Balanç energètic .....	55
5.3.3. Dinàmica del vehicle .....	56
5.3.4. Resum de la disposició 3: motor a roda .....	62
<b>6. Comparativa dels trens de potència .....</b>	<b>63</b>
6.1. Especificacions tècniques .....	63
6.1.1. Acceleració .....	64
6.1.2. Consum .....	64
6.1.3. Pes.....	65
6.1.4. Autonomia.....	66
6.1.5. Velocitat màxima.....	67
6.2. Dinàmica del vehicle .....	68
6.3. Viabilitat .....	69
6.3.1. Viabilitat tècnica.....	69
6.3.2. Viabilitat econòmica .....	69
6.3.3. Viabilitat mediambiental .....	70
<b>7. Conclusions.....</b>	<b>72</b>
<b>8. Bibliografia.....</b>	<b>74</b>
<b>9. Annex .....</b>	<b>77</b>

## Nomenclatura

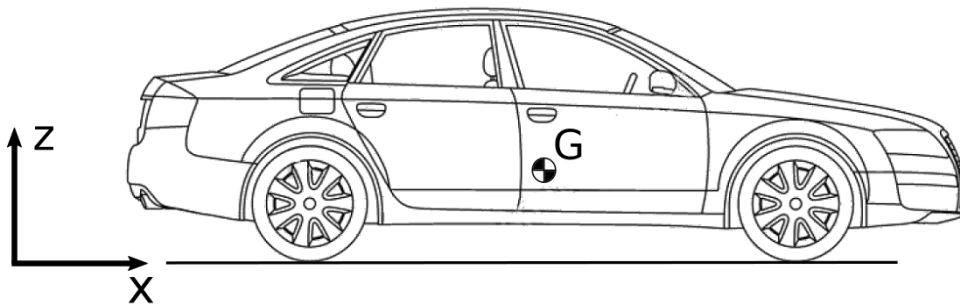
**Vehicle autònom:** vehicle propulsat amb l'energia emmagatzemada en ell, sense obtenció d'energia de l'exterior durant el seu funcionament.

En bateries, **factor C:** factor de Coulomb. 1C correspon a una càrrega o descàrrega completa d'una bateria amb un corrent determinat durant una hora. Així, es tenen els exemples:

- Operant la bateria amb un factor 1C es carrega o descarrega la bateria amb 1h
- Amb un factor 2C es carrega o descarrega la bateria amb 30 minuts
- Operant amb 0,5C es carrega o descarrega la bateria amb 2h.

**Massa del vehicle en ordre de marxa:** massa del vehicle amb tots els accessoris necessaris per funcionar, líquids refrigerants, lubricants, conductor.

**Eixos en el vehicle:** per als càlculs, els eixos que s'agafen són els següents: (sempre en referència vehicle)



**Diferencial amb biaix de parell:** (diferencials Torsen, Quaife) és un tipus de diferencials sensibles al parell: quan un dels eixos de sortida perd tracció, el mecanisme transmet el parell en la proporció adient a la part amb tracció. En aquest tipus de diferencial no cal arribar a la situació de bloqueig per haver-hi traspàs de parell entre els eixos de sortida.

**Diferencial central:** en els vehicles amb tracció a més d'un eix, és el diferencial que reparteix el parell entre els eixos. No cal que estigui físicament al centre del vehicle.

**Efecte Joule:** degut a la resistència elèctrica, quan un conductor transmet corrent s'escalfa, provocant unes pèrdues. En corrent continu la potència dissipada per aquest fenomen és igual a  $R \cdot I^2$ .

# 1. Introducció

---

Els vehicles elèctrics estan experimentant un creixement en vendes i desenvolupament. Les principals causes d'aquest fet són la consciència pel medi ambient i la millora de la tecnologia elèctrica.

Degut al canvi climàtic i per reduir-ne els seus efectes, la legislació referent a la contaminació dels vehicles és cada vegada més estricta. A més, les conseqüències del canvi climàtic comencen a ser prou evidents per a la societat i se'n comença a prendre consciència.

- El fet que els combustibles fòssils no siguin recursos renovables en comparació amb l'escala de temps d'explotació obliga a haver de buscar fonts d'energia alternatives. El declivi previst en el subministrament de combustibles fòssils i la consegüent pujada dels preus dels carburants en els propers anys fan necessària aquesta transició.

- En aparèixer l'electrònica de potència, s'ha pogut regular de manera més precisa l'alimentació elèctrica. Els convertidors i fonts de tensió variables regulades electrònicament ofereixen un gran rang de funcionament i faciliten l'aplicació de sistemes elèctrics a qualsevol àmbit i aplicació.

Per tant, s'observa la necessitat de substituir els motors dels vehicles per motors que utilitzin un altre tipus d'energia: l'energia elèctrica.

## **Alternatives energètiques**

### **Combustibles fòssils**

Qualsevol tipus de combustible fòssil porta associat l'alliberació de CO<sub>2</sub> i altres gasos contaminants en la seva combustió i per tant l'emissió de compostos que promouen l'efecte hivernacle i/o són nocius per al medi ambient (NO<sub>2</sub>, per exemple).

El que es vol amb la substitució dels motors actuals és canviar a una altra font d'energia més neta o bé no perjudicial per al medi ambient. Per tant, cap combustible fòssil compleix aquesta especificació.

### **Combustible nuclear**

La implementació de qualsevol sistema d'obtenció d'energia en un vehicle porta incorporat el perill implícit del vehicle de patir un accident. La perillositat intrínseca per radiació d'aquest combustible fan que no sigui una alternativa viable per a l'obtenció d'energia en un turisme, tot i que energèticament seria plenament factible.

## **Energia elèctrica**

Molts dispositius actuals funcionen amb aquest tipus d'energia, la qual es pot transformar en altres tipus d'energia amb relativa facilitat. L'emmagatzematge d'aquesta energia és possible, però presenta inconvenients amb el rendiment.

En la resta d'aspectes és una energia prou segura per a les persones, sempre que s'adeqüi correctament. El seu transport és senzill i l'impacte natural provocat no va més enllà del que ha provocat la pròpia generació de l'energia.

---

Així, l'energia que s'utilitzarà per substituir l'energia actual serà l'elèctrica per tots els avantatges esmentats que introdueix en front de les alternatives.

Aquest tipus d'energia s'ha de convertir en energia cinètica per propulsar el vehicle amb un tren tractor convencional, és a dir, mitjançant rodes en contacte amb la superfície de circulació. Per tant, caldrà un o més motors.

En el sistema actual la disposició en el vehicle és la d'un sol motor de combustió interna situat normalment a la part davantera. El moviment que el motor produeix cal transmetre'l a les rodes tractores per generar un desplaçament del vehicle. El fet que els cotxes només tinguin un sol motor propulsor és pels següents motius:

- Un motor de combustió interna té diversos sistemes associats per fer-lo funcionar: l'alimentació (carburador, injecció...) el control (arbres de lleves, vàlvules), sistema de refrigeració (circuit, bomba, radiador), entre d'altres. Tots aquests sistemes són necessaris per al motor, però el fan més voluminós i pesant.
- Els motors de combustió interna regulen la velocitat del vehicle per mitjà de l'alimentació. Dos motors diferents implicarien dues regulacions de velocitat, complicant el repartiment del combustible i el funcionament del tren de potència.
- En general, dos motors impliquen la duplicació de molts dels seus components, complicant de manera innecessària el motor del vehicle. Tot i que sí que alguns vehicles han portat o porten excepcionalment dos motors es feia o bé per redundàncies necessàries per seguretat (en aeronaus com helicòpters, per exemple) o per augmentar la potència del vehicle quan per fabricació no es podia obtenir un motor prou potent.

Per aquests motius exposats, els cotxes que utilitzen motors de combustió interna tenen un sol motor.

Amb la introducció del vehicle elèctric, aquestes disposicions dels trens de potència ja no són clarament les òptimes: els motors elèctrics difereixen molt dels motors de combustió interna en gairebé tots els seus aspectes, des de la corba parell-revolucions als sistemes associats motor, obviant el tipus d'energia/combustible.

Per tant, caldrà estudiar diferents disposicions del tren de potència, determinar-ne els avantatges, els inconvenients, les dades tècniques per comparar-los i finalment extreure'n les conclusions adients. Aquest és l'objecte d'aquest Treball de Final de Grau.



## 2. El vehicle: aspectes generals

---

El vehicle del qual se n'estudiarà les diferents distribucions del tren de potència és un turisme comú. Les dades tècniques específiques es tractaran més endavant.

### 2.1. Xassís i bastidor

Els vehicles utilitaris actuals es fabriquen amb molta freqüència sobre un xassís integrat amb el bastidor, és a dir, el xassís i l'habitacle estan integrats l'un amb l'altre i es distribueixen per tot el vehicle. Les parts que formen l'habitacle o cabina, que és on es col·loquen els passatgers i a sobre l'estructura del qual es fixen les portes, seients i comandaments (bastidor) també componen el xassís. Aquesta estructura s'anomena carrosseria autoportant o monobuc. Com el xassís tradicional, la carrosseria autoportant serveix de suport per al motor i rodes i per a la resta de planxisteria que compon el vehicle.



**Figura 2.1:** carrosseria monobuc/autoportant d'un turisme.

Aquest tipus de carrosseria ofereix una bona protecció per als ocupants, ja que els envolta i facilita la fabricació en tenir una bancada on fixar tots els demés elements.

Per contraposició, en vehicles que necessiten poder portar més pes com és el cas de camions, furgonetes pesades, autobusos... el xassís que s'utilitza està format per un esquelet metàl·lic en forma d'escala de mà a sobre del qual es munten els demés elements del vehicle. Les estructures funcionals de la dinàmica del vehicle (motor, direcció, suspensió) estan fixades al xassís, mentre que la cabina és una subestructura en sí mateixa i es fixa al xassís per separat.



**Figura 2.2: bastidor convencional, en forma d'escala de mà, en un vehicle tot terreny.**

El xassís considerat en l'estudi serà el més usual en vehicles utilitaris, la carrosseria autoportant.

## 2.2. Direcció i suspensió

La suspensió d'un vehicle està dissenyada per proporcionar confort als ocupants i per oferir un bon control davant el govern del conductor.

El confort s'aconsegueix permetent que les parts del cotxe que toquen a la carretera puguin accelerar i desplaçar-se de manera separada a la cabina on van els passatgers. En trobar un obstacle, com una irregularitat en l'asfalt, les rodes experimenten una acceleració i un desplaçament en direcció perpendicular al pla per què circula el turisme. La suspensió ha d'assegurar que davant de la irregularitat en la carretera, l'acceleració i moviment que reben els passatgers que hi ha a la part del vehicle suspesa és menor o idealment nul·la.

Per altra banda la suspensió també ha de permetre el govern del vehicle. Per fer-ho és important que les parts del vehicle que estan en contacte amb la superfície per on circula no se'n separin. En trobar la irregularitat abans descrita, tot i que la roda experimenta una acceleració perpendicular a la superfície, es vol que no perdi contacte.

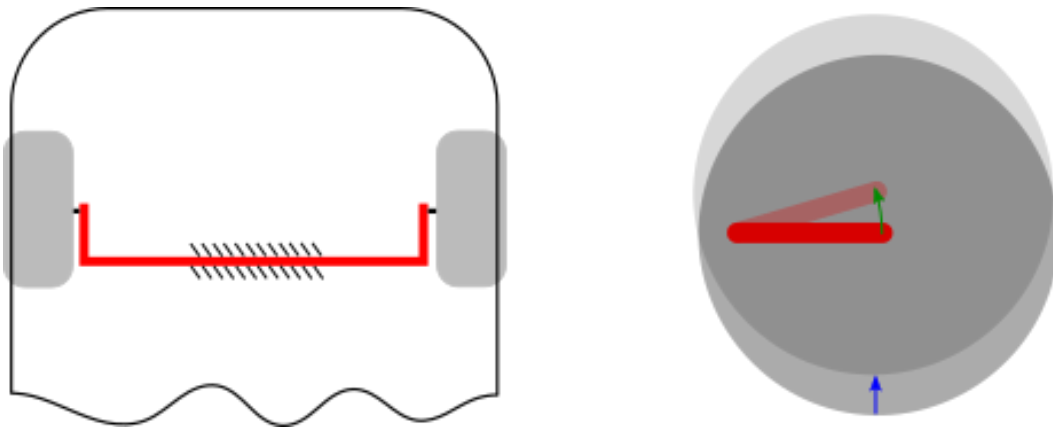
Hi ha diversos tipus de suspensió utilitzats en turismes: [1]

- Suspensió de ballesta: està formada per diverses peces metàl·liques planes posades unes sobre les altres normalment formant un arc de circumferència, semblant als de l'arma que li dona nom. Els sòlids, d'igual resistència a la flexió, poden lliscar uns sobre els altres en canviar la curvatura durant l'actuació de la suspensió i causa un efecte esmorteïdor. En general, els extrems de l'arc es fixen a la part suspesa mentre que al centre s'hi ancora la roda.



**Figura 2.3: suspensió de ballesta**

- Suspensió per barres de torsió: utilitzant les propietats elàstiques de l'acer es disposa una barra en forma de L; a un extrem s'hi fixa la roda i l'altre és fix a la part suspesa. Sovint la suspensió d'un mateix eix comparteix una mateixa barra de torsió, com es veu a la figura.



**Figura 2.4: suspensió per barres de torsió**

- Suspensió per molles helicoïdals: es podria considerar com un cas de barres de torsió, ja que el principi en què es basa és el mateix, però la disposició del mecanisme és diferent. En aquest cas la barra d'acer és cilíndrica i està corbada de forma helicoïdal.



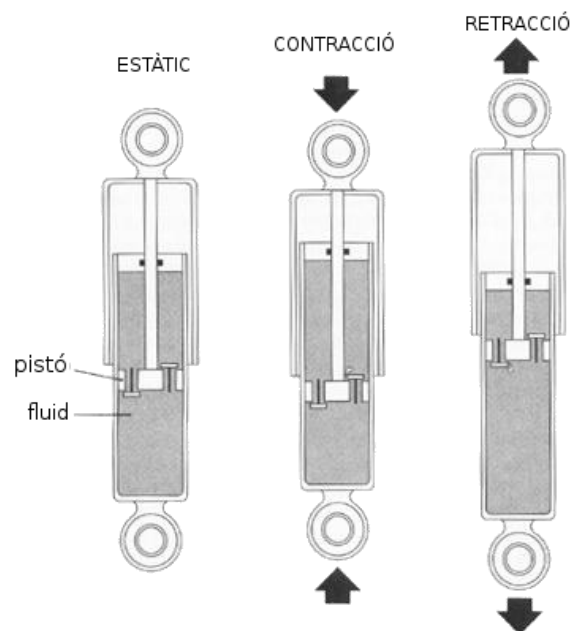
**Figura 2.5: conjunts molla-amortidor d'una suspensió amb molles helicoïdals.**

- Suspensió per aire (pneumàtica): es basa en les propietats que ofereix l'aire comprimit per aprofitar-les per convertir l'energia cinètica del moviment vertical de la roda en energia potencial (pressió).



**Figura 2.6: suspensió per aire.** En l'element seccionat es pot observar el tac de goma auxiliar en cas que una pèrdua de pressió d'aire prou important inutilitzi la suspensió.

A més de la conversió d'energia, la suspensió també ha de dissipar-la; altrament es produiria una oscil·lació continuada del vehicle. Per fer-ho, cal introduir esmorteïdors. Tot i que hi ha molts sistemes diferents, l'estructura general d'un amortidor es pot assimilar a un cilindre ple d'un fluid i un pistó amb petits orificis. En produir-se un moviment el pistó es desplaça respecte el cilindre amb certa resistència deguda a la restricció que els orificis imposen al pas del fluid.

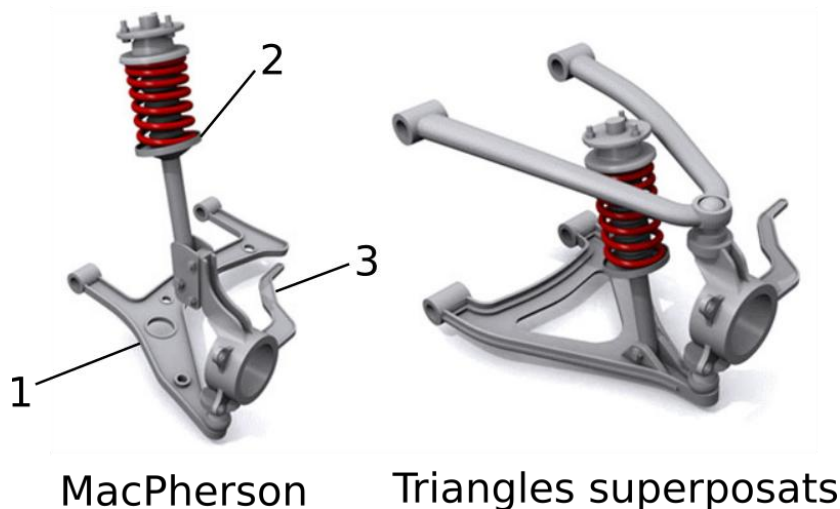


**Figura 2.7: amortidor amb pistó foradat i vàlvules de pas.**

Cal diferenciar entre la suspensió davantera i la posterior, ja que els mecanismes utilitzats tenen diferents graus de llibertat. A la part davantera, on també hi ha la direcció, han d'haver-hi 2 graus de llibertat (rotació de la roda per la direcció i moviment vertical per la suspensió). En canvi, en la part posterior només cal el moviment per la suspensió, 1 grau de llibertat. En aquest cas s'obvia el moviment de rotació de la roda. El raonament es refereix al suport (eix) de la roda, on aniria ancorat el fre.

La suspensió més comuna en turismes europeus és la denominada MacPherson, en contraposició a la disposició amb triangles superposats. Els avantatges de la suspensió MacPherson són la seva senzillesa, baix pes i el poc espai que ocupa en comparació a la suspensió de triangles superposats.

Agafant com a referència el xassís del vehicle, la suspensió està formada per 2 sòlids (1 sòlids i grup molla-amortidor) que l'uneixen amb el suport de la roda. L'esquema és el següent:



**Figura 2.8:** suspensions típiques en turismes.

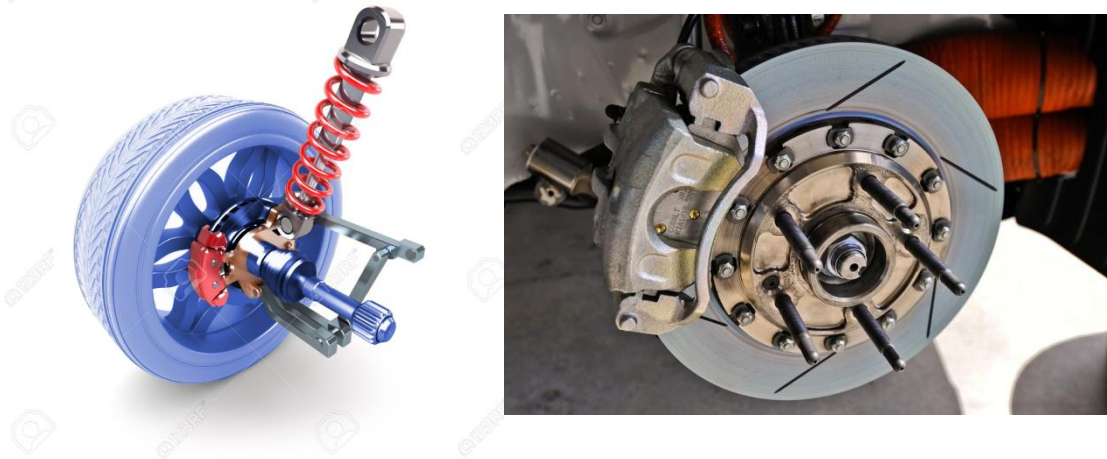
La peça 1 restringeix 3 graus de llibertat al suport de la roda (enllaç de revolució+ròtula esfèrica), mentre que el grup molla-amortidor (2) en restringeix 2 (enllaç cilíndric). Per fer el sistema més compacte l'amortidor se situa dins la molla. El mecanisme de la part davantera on hi ha la direcció té un grau de llibertat que permet la rotació de la roda sobre un eix vertical controlat per la part 3. Si es tracta d'una de les rodes posteriors la part 3 es fixa al xassís mitjançant una barra amb ròtules esfèriques als extrems.



## 2.3. Rodes

Les rodes d'un vehicle són l'únic element de seguretat activa de què disposa. En tot moment estan en contacte amb la superfície per què circula el vehicle i són les responsables dels moviments controlats: accelerar/frenar i canvi de direcció. En un turisme les rodes estan formades de les següents parts:

- Llanda: serveix d'unió entre la part que està en contacte amb la superfície de contacte amb el terra (pneumàtic) i el suport de llanda solidari a l'eix.



**Figura 2.9: (esquerra) En blau hi ha marcades les parts mòbils que poden girar en una suspensió MacPherson. (dreta) Detall de l'ancoratge d'una roda en l'extrem d'un palier: s'observa el patí, el disc de fre i el suport de llanda.**

- Pneumàtic: està en contacte amb el terra. Necessita tenir una bona adherència per permetre el correcte control del vehicle. Idealment, els punts del pneumàtic que estan en contacte amb el terra tenen velocitat zero.

La unió de les rodes amb el cotxe es duu a terme mitjançant el suport de llanda, el qual té fixat el disc de fre:

- Suport de llanda: és la part on es colla la roda. Està format per un disc fixat a l'eix de gir. Té forats i espàrrecs roscats per permetre la unió amb el disc de fre i la llanda, respectivament.
- Disc de fre: és solidari al suport de llanda. Amb conjunció amb la pastilla de fre permet la dissipació mitjançant la fricció de l'energia cinètica del turisme o bé en manté el repòs.

## 2.4. Habitacle

L'habitacle és la zona on se situen els passatgers del vehicle. Com s'ha comentat anteriorment, el xassís que s'estudiarà és l'integrat, amb la qual cosa l'habitacle queda situat dins la carrosseria monobuc. Els turismes tenen un únic habitacle en el qual hi ha els elements de control del vehicle a la part davantera, on també hi ha el seient del conductor. Els altres seients estan situats al costat (copilot o acompanyant) i darrere; generalment darrere hi ha 3 places. Això es deu al fet que els turismes tenen una amplada de 1,7 a 1,8 metres. A la fila de seients de davant en aquest espai hi ha d'haver els seients i elements de control del vehicle, com la palanca del canvi de marxes i el volant. A més, el conductor ha de poder moure's correctament per dirigir el volant i interactuar amb els controls. La fila de darrere no té aquesta restricció, per la qual cosa té una plaça més.



**Figura 2.10: habitacle d'un Alfa Romeo Giulietta del 2011.**

L'habitacle ha d'estar adaptat per proveir confort i protecció als passatgers. Així els seients, les portes, vidres, davantal i acabats interiors han de ser ergonòmics i permetre una correcta visibilitat de l'exterior.



**Figura 2.11: esquema de habitacle d'un turisme en configuració sedan.**

## 2.5. Espais auxiliars

Els espais en què no viatgen passatgers s'anomenaran espais auxiliars. Tenint en compte aquesta definició, els espais auxiliars en un turisme són 3: el compartiment del motor, el maleter i el dipòsit de combustible. Aquests tenen unes dimensions considerables en relació al volum total del vehicle i es poden utilitzar per allotjar altres sistemes necessaris per al vehicle. Un exemple d'això en són l'ordinador de bord, l'aire condicionat i l'aigua neteja parabrises, els quals estan situats al mateix espai que el motor.

## 2.6. Especificacions tècniques

Els càlculs es realitzaran sobre un turisme model. Les dades no s'ajusten a cap model de vehicle en concret, ja que un turisme determinat difereix dels altres en certes característiques tècniques, però en termes generals presenten similituds. El vehicle resultant serà un conglomerat d'especificacions tècniques de diversos turismes existents, conformant així un exemple representatiu general, no un cas concret.

### Característiques generals

<b>Tipus de vehicle</b>	Turisme
<b>Tipus de carrosseria</b>	Sedan / Berlina
<b>Segment</b>	D
<b>Places</b>	5
<b>Portes</b>	4

Taula 2.1: característiques generals de la configuració de la carrosseria del vehicle

### Dimensions

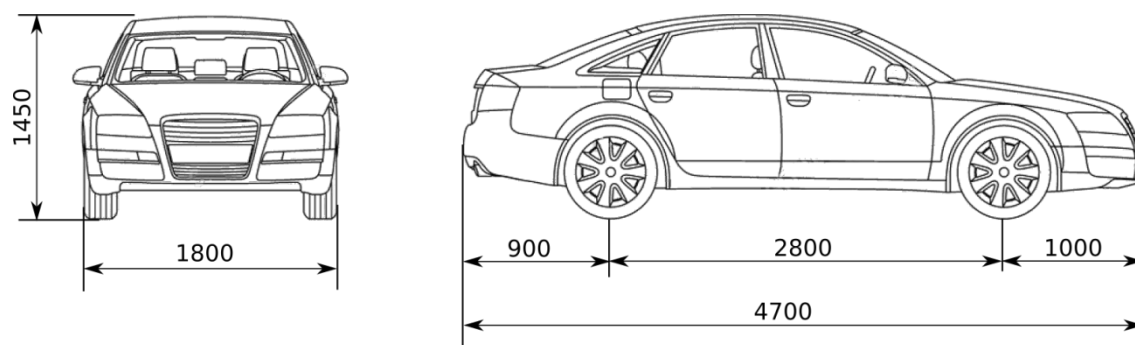


Figura 2.12: dimensions generals del vehicle en la configuració indicada a la Taula 2.1

Les dimensions generals del vehicle són les indicades a la figura 2.12. Les mides són orientatives, variant diversos mil·límetres depenent del model concret de turisme. En aquest cas, però, es tracta d'un turisme genèric amb mides corrents per aquest tipus de vehicle. [2]



## Massa i centre de gravetat (G)

Per suportar el pes concentrat de la bateria caldrà enfortir la carrosseria, augmentant-ne la massa uns 100 kg. Per tant, la massa total serà quelcom superior.

Component	Massa (kg)	Posició z de G (m)
Carrosseria	383 (+100)	0,60
Suspensió	175,5	0,35
Tancaments	159,5	0,60
Rodes (llanda i pneumàtic)	95,7	0,35
Exteriors	79,8	0,60
Interiors	159,5	0,50
Direcció i frens	32	0,35
Aire condicionat	48	0,50
Parts elèctriques i electròniques	63,8	0,70
TOTAL	1296,8	0,53

**Taula 2.2: massa i centre de gravetat dels elements d'un turisme sense tren de potència [2][3]**

Per mantenir totes les especificacions donades anteriorment i el centre de gravetat es fixa una massa màxima del vehicle en ordre de marxa de 2000 kg, tenint un marge d'un 5% ( $\pm 100$  kg) per acomodar possibles canvis en el disseny. Masses superiors implicarien haver d'adaptar els components del vehicle (xassís, suspensions, pneumàtics) per suportar el pes i l'energia cinètica que comporta. Això n'augmentaria a la vegada encara més el pes, la complexitat i el cost. S'intentarà, sempre que sigui possible, adaptar els elements ja existents en turismes amb motors de combustió interna al tren de potència elèctric.

## Altres especificacions

Resistència aerodinàmica:

En el disseny de l'exterior del vehicle, a banda de la vessant estètica s'intenta reduir la resistència aerodinàmica. Especialment en els vehicles elèctrics s'intenta prioritzar el disseny orientat a reduir el fregament amb l'aire. Un valor comú que s'agafarà de referència del coeficient de fregament  $C_D$  és 0,25.

Per tant, la força aerodinàmica que s'exercirà sobre el cotxe en avançar és:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot v^2 \quad ; \quad \text{on:} \quad (2.1)$$

(Es nota que la fórmula 2.1 és per a fluxos turbulents, com en un turisme circulant a prou velocitat)

$\rho$ : densitat del fluid (aire,  $1,205 \text{ kg/m}^3$ )

A: àrea projectada ortogonal a la velocitat (turisme,  $2,15 \text{ m}^2$ )

$C_D$ : coeficient de resistència aerodinàmica (0,25)

$v$ : velocitat del flux del fluid incident en el cos d'estudi. En un vehicle en condicions normals i sense un flux d'aire (vent), la velocitat d'avanç del vehicle és igual a la velocitat del fluid que incideix sobre el turisme.

La força de resistència aerodinàmica total del turisme és:

$$F_D = 0,3238 \cdot v^2 \equiv f_D \cdot v^2 \quad (\text{en } N) \quad (2.2)$$

### 3. El vehicle elèctric: sistemes

S'han vist els equipaments i sistemes que actualment els turismes amb motors de combustió interna utilitzen. En un vehicle elèctric aquests sistemes són notablement diferents; molts són reemplaçats per equivalents elèctrics, mentre que d'altres ja no són necessaris degut a la naturalesa intrínseca de l'electricitat (per exemple, el sistema de refrigeració del motor).

#### 3.1. Emmagatzematge d'energia

Com tots els vehicles autònoms, els turismes elèctrics necessiten emmagatzemar l'energia que utilitzen durant el funcionament. En el cas dels vehicles propulsats amb motors de combustió interna, l'energia està emmagatzemada de forma química en el combustible. L'electricitat en sí no es pot emmagatzemar, però l'energia elèctrica que genera el corrent elèctric sí. Els dispositius per fer-ho són les bateries, les quals mantenen una diferència de potencial entre els elèctrodes.

Fent una comparativa dels diferents tipus de bateries més comuns, tenim:

	NiCd	NiMH	Plom Àcid	Li-ion	Li-ion polímer	Alcalina reutilitzable
<b>Densitat d'energia típica</b> (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	110-160	100-130	80 (inicial)
<b>Resistència interna</b> (inclou circuits perifèrics) en mΩ	100 a 200 6V pack	200 a 300 6V pack	<100 12V pack	150 a 250 7.2V pack	200 a 300 7.2V pack	200 a 2000 6V pack
<b>Cicle de vida</b> (al 80% de la capacitat inicial)	1500	300 a 500	200 a 300	500 a 1000	300 a 500	50 (al 50%)
<b>Temps de càrrega ràpida</b>	1h típic	2-4h	8-16h	2-4h	2-4h	2-3h
<b>Tolerància a la sobrecàrrega</b>	moderada	baixa	alta	molt baixa	baixa	moderada
<b>Pèrdua / Mes</b> (condicions estàndard)	20%	30%	5%	10%	~10%	0.3%
<b>Voltatge per cel·la</b> (nominal)	1.25V	1.25V	2V	3.6V	3.6V	1.5V
<b>Corrent de la càrrega</b>						
- pic	20C	5C	5C	>2C	>2C	0.5C
- millor resultat	1C	0.5C o menor	0.2C	1C o menor	1C o menor	0.2C o menor
<b>Temperatura de funcionament</b> (descàrrega)	-40 a 60°C	-20 a 60°C	-20 a 60°C	-20 a 60°C	0 a 60°C	0 a 65°C
<b>Manteniment necessari</b>	30 a 60 dies	60 a 90 dies	3 a 6 mesos	no cal	no cal	no cal
<b>Cost típic</b> (US\$, com a referència)	\$50 (7.2V)	\$60 (7.2V)	\$25 (6V)	\$100 (7.2V)	\$100 (7.2V)	\$5 (9V)
<b>Cost per cicle</b> (US\$)	0.04	0.12	0.10	0.14	0.29	0.10-0.50
<b>En ús comercial des de</b>	1950	1990	1970	1991	1999	1992

**Taula 3.1: Battery University, Characteristics of commonly used rechargeable batteries [4]**

És important observar la primera fila de la Taula 3.1, la densitat d'energia. Aquest paràmetre indica l'energia que es pot emmagatzemar per unitat de massa de la bateria. En vehicles elèctrics autònoms és d'especial importància

donat que la capacitat dels sistemes comercials actuals d'emmagatzemament d'energia elèctrica són molt inferiors a l'energia química continguda en combustibles fòssils.

La densitat d'energia de la gasolina és de 12.600 Wh/kg, mentre que la bateria amb més capacitat és la d'ió de liti amb 260 Wh/kg. Per tant, en termes generals, la gasolina és un ordre de magnitud més energètica que la bateria amb més capacitat d'emmagatzematge. Això suposa un inconvenient a l'hora de valorar l'autonomia assolible d'un vehicle elèctric autònom: per acumular la mateixa energia que l'equivalent amb motor de combustió interna, cal més pes i més espai. Alhora aquest pes i espai addicionals augmenten la resistència a l'avanç del vehicle, la resistència al rodolament i encara en redueixen més l'eficiència.

En conclusió, si l'autonomia d'un vehicle només depengués de la densitat d'energia que pot emmagatzemar, el vehicle que més abast tindria seria el que més densitat d'energia tingués.

Tenint en compte això, un dels requeriments importants a tenir en compte a l'hora de triar el tipus de bateria serà la densitat d'energia. Altres aspectes a tenir en compte poden ser el preu, vida útil, manteniment i rang de temperatures de funcionament.

Si s'analitza la Taula 3.1 es pot veure que la bateria d'ions de liti és la més adequada per a les necessitats exposades. Per tant, serà la bateria que s'utilitzarà per emmagatzemar l'energia del turisme que serà objecte d'estudi.

L'energia que es pot emmagatzemar en una cel·la cilíndrica d'una bateria d'ions de liti, que és la que té més densitat d'energia és de 3 A·h a 3,7V. El volum d'una cel·la de Ø18 x 65 mm és de 16.540 mm<sup>3</sup>, tot i que l'espai que ocupa en una matriu de cel·les és la d'un prisma rectangular de 18 x 18 x 65 mm (21.060 mm<sup>3</sup>). El pes d'una cel·la és de 47,5 g. [5]

L'empaquetament de les cel·les en comparació amb el volum de la bateria no és màxim. No es considerarà un empaquetament hexagonal dels cilindres a fi de tenir en compte l'espai utilitzat pels suports de la bateria (carcassa i estructura interna) i els conductes dels circuits de refrigeració que passen entre les cel·les.

Les bateries s'hauran d'ubicar dins el vehicle i ocuparan un cert espai: com més bateries es puguin encabir més capacitat d'emmagatzemament es tindrà. Tanmateix, per al càlcul de capacitats d'acumulació d'energia s'utilitzaran només els espais ja disponibles al vehicle aplicant-hi alguna modificació. En cap cas en considerarà disminuir notablement l'espai de transport al maleter o dins de l'habitacle.

## Refrigeració

Les bateries experimenten canvis de temperatura en rebre o donar energia a causa de les reaccions químiques que es produeixen al seu interior. Cada tipus de bateria té un ràtio de càrrega i descàrrega nominals. Les bateries d'ions de liti tenen les següents característiques de càrrega i descàrrega.

Operació	Nominal o recomanada	Màxima
<b>Càrrega</b>	0,5C	0,9C
<b>Descàrrega</b>	0,2C	4C

**Taula 3.2: característiques de càrrega i descàrrega de les bateries d'ions de liti. [5]**

Una temperatura ambient elevada o bé unes condicions de càrrega o descàrrega superiors a les nominals eleven la temperatura de la bateria per sobre de l'increment de temperatura normal. Es poden donar situacions on es requereixi una extralimitació de les capacitats nominals de la bateria. Dos exemples d'això serien una demanda excepcional de potència durant la conducció per aconseguir una acceleració determinada o bé si es vol carregar la bateria ràpidament.

Una temperatura massa elevada en la bateria podria provocar-hi danys. Per evitar-ho, cal un sistema de refrigeració que evacui la calor generada. Els sistemes més comuns són els refrigerats per aire i els que utilitzen un líquid refrigerant.

Les disposicions més eficaçes per extreure la calor solen ser les que utilitzen líquids refrigerants degut a la major capacitat calorífica del líquid respecte la de l'aire. Inclús aplicant una convecció forçada d'aire el líquid és més eficaç.

Per refrigerar la bateria s'intercalen uns conductes entre les cel·les. En conseqüència, la bateria augmenta el seu pes i costos de fabricació, però els avantatges que es deriven de l'aplicació d'un sistema refrigerant ho compensen: augmenten la vida útil de la bateria (nombre de cicles de càrrega i descàrrega) i n'augmenten el rendiment (les pèrdues són menors i es pot extreure més energia de la bateria).

## 3.2. Motor elèctric

Per convertir l'energia elèctrica en moviment cal un actuator, un motor. Donat que l'electricitat que està emmagatzemada a les bateries és en forma de voltatge constant (corrent continu) el més directe seria utilitzar un motor elèctric de corrent continu per propulsar el vehicle.

No obstant això en corrent continu l'energia dissipada en la conducció del corrent és  $R \cdot I^2$ , la qual és major que en el corrent altern. Per minimitzar les

pèrdues en la transmissió de l'energia seria possible utilitzar motors de corrent alterna introduint un inversor entre la bateria i el motor. No obstant això l'inversor també tindrà un rendiment propi i disminuirà l'eficiència global.

Per tant a priori seria possible utilitzar els dos tipus de motors; cal analitzar-ho amb més detall: el motors elèctrics que es podrien utilitzar per propulsar el turisme elèctric són els següents:

### Corrent continu

- Motor de corrent continu amb escombretes (*Brush DC*)
- Motor de corrent continu sense escombretes (*Brushless DC*)

### Corrent altern

- Motor de corrent altern sense escombretes, síncron (*Brushless AC*)
- Motor de corrent altern sense escombretes i amb imants permanents (PMAC)
- Motor d'inducció, asíncron

Motor	Avantatges	Inconvenients
<b>CC amb escombretes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control fàcil: relació voltatge – velocitat lineal.</li> <li>- Control de posició</li> <li>- Parell molt alt amb <math>\omega=0</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cal molt manteniment a les escombretes.</li> <li>- Dificultats en l'evacuació de la calor.</li> </ul>
<b>CC sense escombretes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control fàcil: relació voltatge – velocitat lineal.</li> <li>- Parell molt alt amb <math>\omega=0</math>.</li> <li>- Debanats a l'estator.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessitat d'imants permanents i potents (encareix el motor)</li> <li>- Pèrdues en conducció de l'electricitat.</li> </ul>
<b>CA síncron</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Motor síncron.</li> <li>- Debanats a l'estator.</li> <li>- Molt bon rendiment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cal variar la freqüència per al control de velocitat.</li> <li>- Parell d'arrencada molt baix.</li> <li>- Anells de contacte (col·lectors).</li> </ul>
<b>CA síncron, sense col·lectors i amb imants permanents</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Parell d'arrencada alt.</li> <li>- Debanats a l'estator.</li> <li>- Motor síncron.</li> <li>- Molt bon rendiment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cal variar la freqüència per al control de velocitat.</li> <li>- Calen imants permanents.</li> </ul>
<b>Motor d'inducció (trifàsic)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Barats: no incorpora elements cars com imants permanents.</li> <li>- Es pot utilitzar fàcilment com a generador.</li> <li>- Debanats a l'estator.</li> <li>- Parell d'arrencada alt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No es pot controlar de manera fàcil la posició ni la velocitat exacta (lliscament) del rotor.</li> <li>- Cal variar la freqüència per al control de velocitat.</li> <li>- Rendiment relativament baix</li> </ul>

**Taula 3.3: taula comparativa de diferents tipus de motors elèctrics. [8]**

Fent una comparativa dels motors disponibles es determina que el motor de corrent contínua amb escombretes no és un bon candidat per a la seva utilització en vehicles. El manteniment que requereix és necessari realitzar-lo sovint i no és senzill ja que cal accedir a l'interior del motor per canviar les escombretes; especialment en vehicles es prefereix minimitzar el manteniment.

Un altre motor que es pot descartar és el motor síncron. A més de l'inconvenient menor d'haver d'adaptar la corrent de la bateria, és inacceptable un motor que proporcioni parell d'arrencada insuficient per començar a funcionar. Un vehicle ha de poder arrencar des de l'aturada en moltes condicions diferents: amb càrrega, en pujada, marxa enrere... El motor de corrent continu sense escombretes és un bon candidat des del punt de vista mecànic, però energèticament no és tan eficient com el de corrent altern.

El motor d'inducció és un bon candidat, però té un rendiment lleugerament inferior al motor de corrent altern sense escombretes.

Per tant, el motor que es considerarà per l'estudi serà el motor de corrent altern sense escombretes trifàsic, amb imants permanents. Aquest motor és més eficient i té més densitat de potència que un motor d'inducció. A més, opera a temperatures més baixes, la qual cosa augmenta la vida útil de l'aïllant dels debanats i dels coixinets del rotor. [6][7]

### **3.3. Sistemes auxiliars**

Els sistemes auxiliars d'un vehicle són tots aquells no imprescindibles per a la propulsió d'aquest. Dins d'aquest grup s'hi troben els frens, la direcció assistida, l'aire condicionat, la ràdio, el reproductor multimèdia, l'enllumenat del vehicle, ajudes de seguretat en la conducció (ABS, TCS, ESC...), altres ajudes (control de creuer, sistema de detecció de col·lisió, *Hill Holder*, etc.). El consum d'aquests sistemes és molt inferior al del sistema motor principal del vehicle, però no s'ha de menystenir.

### **3.4. Electrònica de potència per als sistemes**

En un turisme els sistemes que no funcionen amb l'energia cinètica generada pel moviment de motor que propulsa el vehicle ho fan amb energia elèctrica. Com cada sistema és diferent també tindrà uns requeriments diferents d'energia i caldrà subministrar de manera individualitzada a cada element l'energia que li pertoca. En molts dels sistemes d'un cotxe convencional s'utilitza directament l'energia de la bateria (i/o alternador). Sovint la il·luminació

del vehicle, sistemes electrònics de control, motor d'arrencada, ràdio, aire condicionat... funcionen amb el voltatge de la bateria de 12V.

Amb la transició a un cotxe completament elèctric la bateria no serà de 12V, sinó superior, degut a les necessitats energètiques del motor. Per tant, caldrà adaptar l'energia emmagatzemada al voltatge necessari per les aplicacions. Donada una font a un voltatge continu, no es coneix cap manera de canviar la tensió en corrent continu sense tenir pèrdues molt grans. Un control per PWM (*Pulse Width Modulation*), modulació per amplada de polsos, no sempre és convenient: en l'electrònica s'hi provoca massa harmònics i en l'enllumenat es percep intermitència si es treballa a freqüències inferiors a 100 Hz. Per evitar això un bon mètode és canviar el voltatge primer convertint el corrent continu en altern, mitjançant un transformador es regula la tensió alterna i amb la tensió ja ajustada es torna a convertir a contínua. A aquest aparell se l'anomena convertidor CC-CC indirecte. [9]

Caldrà adaptar els sistemes del turisme a la tensió corresponent. Tot i això, hi podria haver sistemes específics que requerissin un voltatge o tipus de corrent diferent. En aquests casos s'introduiria un sistema convertidor per alimentar correctament l'aparell.

### 3.5. Motor

El motor principal del cotxe difereix molt dels demés sistemes del vehicle: la potència, requeriments energètics i tipus d'energia (CC o CA) són molt diferents a la dels altres aparells. Per aquestes característiques singulars el motor tindrà un convertidor propi amb la potència i característiques específiques per alimentar-lo correctament.

Com que el consum energètic d'aquesta part serà molt gran, és d'especial importància escollir un sistema d'alimentació el més eficient possible i que li permeti al motor operar al punt òptim de funcionament. A més, també serà interessant triar un motor i sistema d'alimentació bidireccionals, de manera que quan per circumstàncies de la circulació l'energia cinètica del vehicle sigui excessiva el sistema que abans el propulsava ara pugui actuar com a fre. D'aquesta manera es pot tornar a convertir l'energia cinètica en elèctrica, recuperant part de l'energia subministrada anteriorment.

Les característiques mecàniques d'un motor elèctric de corrent alterna i síncron són:

- Parell: el parell que pot proporcionar un motor de corrent alterna és constant a l'aturada i a baixes revolucions, limitat pel corrent que pot circular pels debanats del motor.



*(Un corrent excessiu provocarà unes pèrdues per efecte Joule que superaran la calor que pot evacuar el motor, augmentant-ne la temperatura. A partir d'una certa temperatura l'aïllant dels cables dels debanats pot fondre's, provocant curtcircuits i malmetent el motor.)*

- Velocitat: la velocitat de gir d'un motor de corrent alterna sense escombretes (autoexcitat) és força elevada, ja que no hi ha elements mòbils ni amb fricció si s'exceptua l'eix del propi motor. En aquest tipus de motor no hi ha escombretes ni col·lectors. Tot i això, com qualsevol dispositiu mecànic, els coixinets que guien l'eix sí tenen un límit de velocitat angular, encara que aquesta pugui superar les 12.000 rpm.

- Potència: com totes les màquines elèctriques, té un límit de potència que li podem subministrar.

En motors de combustió interna el consum ve donat per la cilindrada i pel ràtio de funcionament, és a dir, l'entrega de potència i les revolucions. En general, un motor de més cilindrada consumirà més que un motor amb menys desplaçament. En canvi, un motor elèctric només consumeix per la potència que entrega, no té un consum intrínsec per la potència nominal del motor (desplaçament) ni té ralentí. Per tant, idealment un motor elèctric de 100 kW entregant-ne 50 i un motor de 50 kW entregant 50 kW consumeixen el mateix.

Molts vehicles utilitaris tenen potències en el rang de 67 kW a 82 kW (90 a 110 cv), mentre que el seu pes és al voltant dels 1500 kg. Això suposa una potència específica de 49,7 W/kg (agafant 75 kW, 100 cv). Mantenint aquesta ràtio (50 W/kg), si considerem un vehicle de 2000 kg el motor haurà de tenir 100 kW de potència.

En l'estudi es considerarà tren tractor que tingui una potència nominal de 100 kW, ja sigui en un sol motor o en la suma de diversos motors. A diferència dels motors de combustió interna, és relativament senzill sobrealimentar un motor elèctric. A més, sempre que es realitzin cicles de sobrecàrrega controlats, no és perjudicial pel motor.

La potència màxima en del tren tractor serà de 160 kW. Els motors elèctrics es poden sobrecarregar al voltant del 50% del valor nominal i lleugerament més si estan refrigerats per una font externa. Tanmateix, la sobrecàrrega no serà sostenible de manera continuada: només s'utilitzarà en moments que requereixin potència addicional a la nominal. Només es podran aplicar potències superiors a la nominal quan les condicions de temperatura del motor ho permetin. Hi haurà d'haver sistemes electrònica que controlin els cicles de sobrecàrrega per evitar provocar danys al motor.

El consum d'energia dels sistemes que funcionen en règim estacionari és:

<b>Sistema</b>	<b>Potència</b>	<b>Percentatge</b>
Frens	70 W	3,4 %
Direcció assistida	400 W	19,5 %
Eixugaparabrises	60 W	2,9 %
Aire condicionat	720 W	35 %
Multimèdia	300 W	14,6 %
Enllumenat (tot)	500 W	24,4 %
TOTAL	2050 W	(100 %)

**Taula 3.4: consum mitjà d'energia dels sistemes d'un vehicle en règim estacionari.**

Aquesta energia ha de provenir de la bateria. S'haurà de sumar la potència del motor al consum energètic dels sistemes auxiliars, ja que la bateria ha de tenir prou potència i capacitat per proveir l'energia requerida de manera prolongada. A banda d'això, el cicle de treball de la bateria podria superar en certs moments la potència nominal, com quan s'utilitzen altres sistemes com els alçavidres, l'encenedor, escalfa-seients... en conjunció amb els sistemes de la taula en règim estacionari. No obstant això, aquests períodes seran transitoris i no superant els màxims de funcionament marcats per les constants tèrmiques intrínseques del sistema.

## 4. Estudi energètic

---

Per fer viable el tren de potència en un vehicle elèctric calen dos trets fonamentals: autonomia i potència. La potència ve donada pel motor que s'instal·li al turisme, però l'autonomia no té un estudi tan clar, ja que depèn de molts factors.

Els factors que influeixen en l'autonomia d'un vehicle són els següents:

- Massa del vehicle
- Capacitat d'emmagatzematge energètic
- Eficiència del tren de potència (bateria, motor)
- Resistència a l'avanç (contacte)
- Resistència aerodinàmica
- Velocitat de circulació
- Inclinació del terreny

Alguns factors presenten interaccions:

- La capacitat d'emmagatzematge energètic està directament relacionada amb la massa del vehicle.
- L'eficiència del tren de potència dependrà de la potència requerida, relacionada amb tots els altres factors.
- La resistència de contacte amb el terra variarà amb la velocitat; per exemple, per arrencar des de l'aturada cal vèncer el parell de rodolament.
- La velocitat de circulació influeix directament en la resistència aerodinàmica, però també intervé en la demanda energètica del tren de potència i en la seva eficiència.
- El pendent del terreny influirà en la potència que es necessita en funció de la massa del vehicle.

Es pot observar que l'estudi de l'autonomia d'un vehicle és molt complex i depèn de moltes variables, algunes difícilment mesurables. Caldrà reduir la variabilitat provocada per les fluctuacions en les variables no controlables en el disseny del tren de potència del vehicle.

Les variables controlables en el disseny són:

- Massa del vehicle
- Capacitat d'emmagatzematge energètic
- Eficiència del tren de potència

## 4.1. Energia necessària

El consum energètic d'un vehicle està directament relacionat amb l'autonomia d'aquest. Tanmateix, és un paràmetre molt difícil de determinar i sotmès a les mateixes variables presentades anteriorment quan es presentaven els factors que afecten a l'autonomia.

Per acotar les dades de manera fidedigna a la realitat, s'utilitzarà unes dades de consum energètic de diversos vehicles en funció del pes. Així s'obindrà una relació general entre el consum energètic d'un turisme i el seu pes.

La recta de regressió que s'ajusta a les dades és la següent (A.2): [10]

$$e \text{ [km/kWh]} = -0,001738 \cdot m \text{ [kg]} + 8,88$$

Aquesta expressió servirà per determinar la despesa energètica del vehicle donada la seva massa i a partir d'això es calcularà l'autonomia d'una disposició del tren de potència.

L'equació que determina els quilòmetres que recorre el vehicle per cada quilowatt per hora d'energia subministrada té la forma genèrica d'una recta  $y=a \cdot x+b$ , on la variable  $x$  és la massa. La funció  $y(x)$  té unitats de consum unitari (invers)  $[\text{consum}^{-1}]$ , és a dir,  $(\text{kWh/km})^{-1}$ . Per tenir unitats d'autonomia (km) cal fer les següents conversions:

*Definim  $\gamma$  com l'energia específica de la bateria, és a dir, l'energia que pot emmagatzemar per unitat de massa de la bateria. Aquí, en kWh/kg.*

$$e \cdot \gamma \cdot m_b = \left( -0,000895 \cdot \overbrace{(m + m_b)}^{m_{TOTAL}} + 8,17 \right) \cdot \gamma \cdot m_b \quad (4.1)$$

*Fent l'anàlisi dimensional de l'equació resultant es té:*

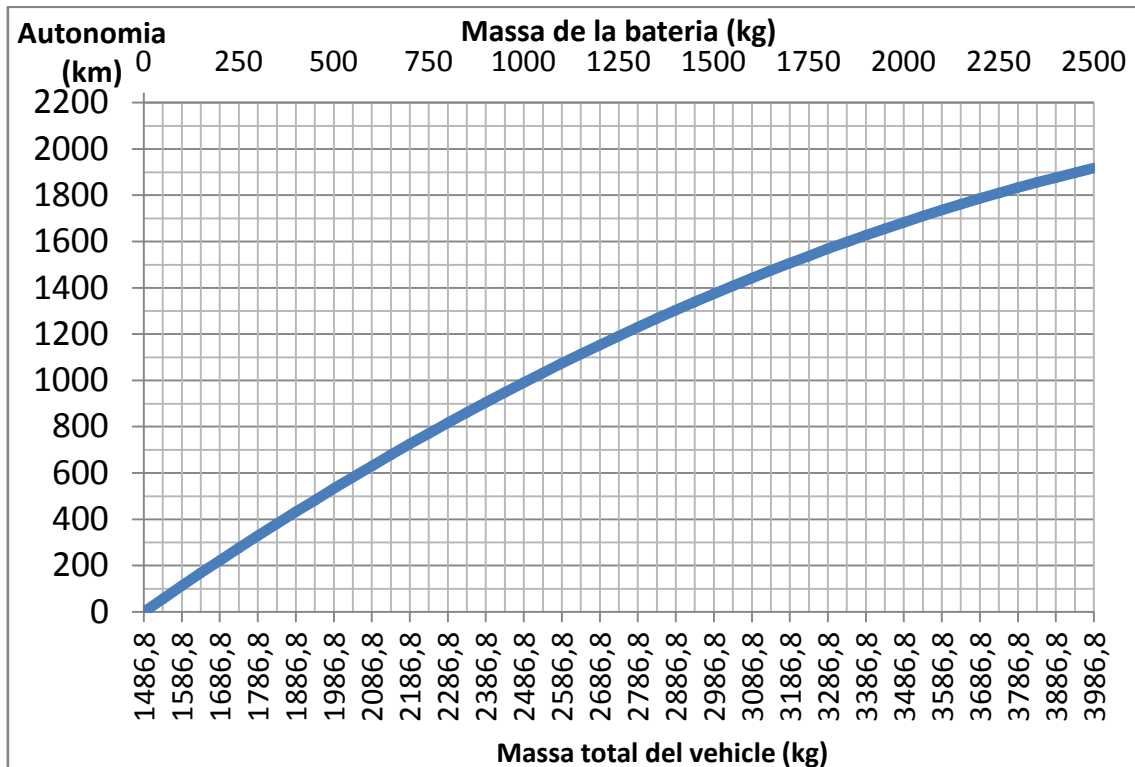
$$\frac{\text{km}}{\text{kWh}} \cdot \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \cdot \text{kg} = \left( -\frac{\text{km}}{\text{kWh} \cdot \text{kg}} \cdot \text{kg} + \frac{\text{km}}{\text{kWh}} \right) \cdot \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \cdot \text{kg} \rightarrow \text{km (autonomia)}$$

Per tant, l'equació anterior es pot expressar de la següent manera:

$$e' [km] = (-0,000895 \cdot (m + m_b) + 8,17) \cdot 0,1667 \cdot m_b \quad (4.2)$$

Ara l'equació té l'aspecte d'una paràbola. El valor màxim de la paràbola indica l'autonomia màxima assolible i el pes màxim de la bateria pel qual les pèrdues ocasionades per l'augment de massa superen els guanys de la capacitat d'emmagatzemament d'aquesta. A partir d'aquest punt en incrementar la mida (i pes) de la bateria l'autonomia disminueix en comptes d'augmentar.

Cal fer un estudi d'aquest fet per determinar la capacitat òptima de la bateria i detectar si la massa crítica per la qual l'autonomia es redueix queda dins del rang de mides de bateria que pot dur un vehicle. El següent gràfic relaciona la massa de la bateria respecte la capacitat d'acumulació d'energia a partir de les dades. El gràfic (Figura 4.1) correspon a un turisme amb un pes de 1486,8 kg sense tenir en compte la bateria: en l'equació 4.2,  $m=1486,8$  kg.



**Figura 4.1:** autonomia d'un vehicle (eix y, km) davant la massa total del vehicle en variar la massa de la bateria (eix x, kg).

Analíticament, la paràbola donada per l'equació anterior té el màxim a 4217,5 kg de bateria (5704 kg totals). Com és fora del rang factible de mides de bateria la massa crítica no estarà en l'interval a considerar.

Per raons de maniobrabilitat, seguretat i consum energètic es prefereix un cotxe el més lleuger possible. El pes del cotxe en ordre de marxa haurà de ser

inferior o igual a 2000 kg ( $\pm 5\%$ ), com s'ha comentat anteriorment. Això obligarà a canviar la mida de la bateria si dels elements del tren de potència superen aquesta limitació.

La corba representada en aquest apartat és independent del tren de potència utilitzat i el considera de rendiment 1, és a dir, ens dona l'autonomia màxima assolible donada la capacitat de la bateria. En altres paraules, la corba no té en compte el rendiment del tren de potència, el qual desplaçaria la paràbola cap a baix.

L'eficiència del tren de potència tindrà un efecte directament relacionat amb l'autonomia. En rendiment dependrà de la disposició del tren, la qual cosa s'estudiarà més endavant. L'autonomia donada per l'equació anterior aplicant l'efecte de l'eficiència del tren de potència queda de la forma indicada a l'expressió 4.3.

$$e' [km] = ((-0,00158 \cdot (m + m_b) + 7,16) \cdot 0,1667 \cdot m_b) \cdot \eta \quad (4.3)$$

## 5. Disposicions del tren de potència

### 5.1. Motor i eix motriu adjacents

#### 5.1.1. Descripció general

La disposició més directa per substituir el sistema propulsor actual és la de reemplaçar el motor de combustió interna per un d'elèctric situat al mateix lloc que ocupava el motor anterior. Anàlogament, l'energia s'emmagatzemaria al mateix lloc que abans ocupava el dipòsit de combustible i l'espai adjacent. Com la bateria té un gruix considerable i els baixos del xassís d'un turisme són molt primers, caldria dissenyar el xassís per un cotxe elèctric deixant espai per a la bateria. Com a resultat, l'alçada total del cotxe augmentaria en l'alçada de la bateria.

Una disposició àmpliament utilitzada és la propulsió davantera amb motor davanter. En estar propers el motor i l'eix de les rodes motrius són necessaris menys elements de transmissió i s'aconsegueix un vehicle amb una massa menor que si s'hagués de transmetre el moviment a les rodes posteriors. Alhora, aquesta reducció de pes porta implícita una reducció del consum de combustible i per tant un augment de l'eficiència del turisme.

En efectes pràctics i de càlculs, la disposició amb propulsió davantera i motor davanter és idèntica a la propulsió posterior i motor posterior. Per simplificar, s'estudiarà la disposició com a tren davanter, el més comú. D'aquí en endavant, si no s'especifica el contrari, tot el referit com a "tracció davantera" és extrapolable a la tracció posterior mantenint aquesta configuració. Com que el motor elèctric és molt més lleuger que el motor de combustió interna, es negligirà en els càlculs la variació de la posició  $x$  del centre de gravetat. Així, es considerarà un vehicle totalment equilibrat amb un repartiment del pes als eixos de 50:50.

#### Bateria

Cel·les	Dimensions aproximades (m)	Massa (kg)	Capacitat
10600	1,3x0,1x1.8 (0,234 m <sup>3</sup> )	504	117 kW·h

Taula 5.1: dades de la bateria d'ions de liti en la disposició 1 del tren de potència.

#### Motor

Tipus	Dimensions aproximades(m)	Massa (kg)	Potència nominal	Potència màxima	Parell màxim
Síncron CA, IP	Ø0,4x0,6	100 <sup>1</sup>	100 kW	160 kW	350 N·m

Taula 5.2: dades del motor síncron de corrent alterna amb imants permanents utilitzat en la disposició 1 del tren de potència.

<sup>1</sup> amb sistema refrigerant.

## Electrònica de potència

Tipus	Dimensions aproximades (m)	Massa (kg)	Potència nominal
Inversor de tracció bidireccional	0,4x0,4x0,2 (0,032 m <sup>3</sup> )	20	110 kW

Taula 5.3: dades de l'inversor de tracció bidireccional de la disposició 1 del tren de potència.

Amb aquesta disposició és necessari un sistema refrigerant per evacuar la calor generada al motor i a l'inversor, sobretot amb règims de treball elevats.

### 5.1.2. Balanç energètic

L'energia continguda a la bateria es transforma a energia cinètica durant la propulsió. En frenada regenerativa l'energia flueix en sentit contrari.

#### Flux d'energia

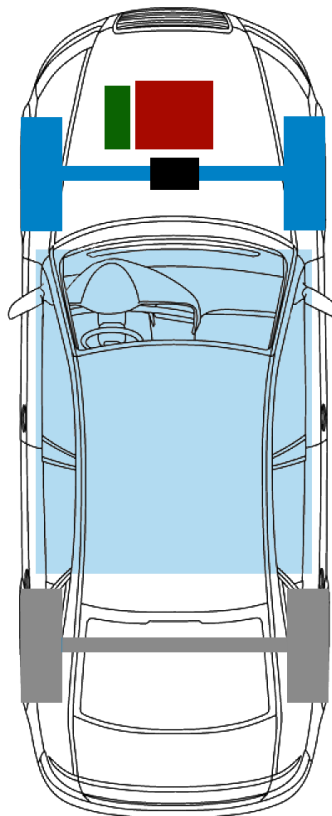
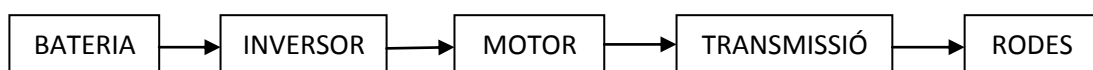


Figura 5.1: esquema general del tren de potència en la disposició amb motor i eix motriu adjacents. En blau hi ha marcades les parts que són motrius.

Propulsió:





Frenada regenerativa:



	Bateria	Inversor	Motor	Transmissió	Rodes	$\eta$ total
Eficiència	0,99	0,95	0,94	0,97	0,94	0,80

Taula 5.4: eficiència (rendiment energètic) dels elements de la disposició 1 del tren de potència. [11]

L'eficiència màxima del vehicle és del 80%. Des que l'energia provinent de l'exterior s'emmagatzema a la bateria fins que aquesta és convertida en energia cinètica se'n perd un 20%. En comparació amb els vehicles de combustió interna, el rendiment dels quals és del 15%, és una pèrdua energètica molt petita.

## Refrigeració

L'energia que s'ha de dissipar en el motor en estat estacionari són les pèrdues per efecte Joule quan els components elèctrics i electrònics del tren de potència subministren la potència nominal. Per tant, la calor que s'ha d'evacuar es calcula com:

$$Q = (1 - \eta) \cdot P_{nominal} \quad (5.1)$$

Quan el motor funciona a la potència nominal, els demés elements funcionen a les potències d'alimentació requerides respectivament. Així:

Component	Potència nominal de treball	Rendiment	Pèrdues
<b>Bateria</b>	115 kW	0,99	1.200 W
<b>Inversor</b>	106,4 kW	0,95	5.320 W
<b>Motor</b>	100 kW	0,94	6.000 W
<b>TOTAL</b>	112 kW	0,88	12.520 W

Taula 5.5: pèrdues per calor del tren de potència de la disposició 1.

En aquesta disposició el motor està refrigerat amb un circuit tancat juntament amb l'inversor. Aquest circuit ha d'evacuar 11.320 W en règim estacionari.

La refrigeració de la bateria només ha d'evacuar 1200 W, els quals es podrien evacuar amb convecció amb l'aire ambient. No obstant això, el sistema de refredament és necessari degut a que la bateria d'ions de liti treballa millor i amb més eficiència a temperatures inferiors a 60°C. Sense un sistema de refredament forçat no es pot assegurar aquesta temperatura per a una temperatura ambient i règim de funcionament qualssevol.

### 5.1.3. Dinàmica del vehicle

Les rodes motrius són únicament les de l'eix davanter: tracció davantera. El motor transmet el moviment al diferencial, el qual reparteix el parell entre les dues rodes de l'eix. La relació de transmissió ( $\tau$ ) entre el motor i l'eix de les rodes és 1:9.

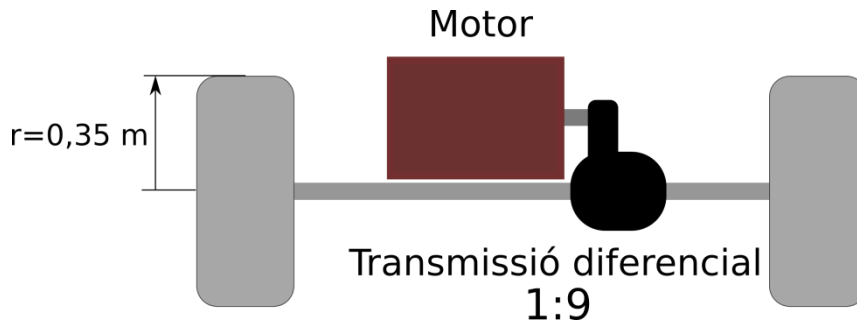


Figura 5.2: esquema de la part propulsora del tren de potència.

#### Posició del centre de massa

La posició del centre de massa del vehicle afectarà a la conducció. En accelerar, frenar o en canviar de direcció (acceleració lateral) el vehicle s'inclina. Un centre de massa baix, és a dir proper a la superfície per què circula el vehicle, li donarà més estabilitat i tolerància a les acceleracions reduint aquesta inclinació. En general, els vehicles elèctrics que tinguin la bateria a la part inferior tindran un centre de massa més baix que el seu equivalent de propulsió amb motor de combustió interna.

Tenint en compte els càlculs realitzats a la Taula 5.6, l'altura del centre de massa resultant és 0,463 m:

Component	Massa (kg)	Posició z de G (m)
Cotxe sense tren de potència	1296,8	0,53
Bateria	504	0,30
Motor	100	0,40
Inversor	20	0,50
<b>TOTAL</b>	<b>1920,8</b>	<b>0,463</b>

Taula 5.6: centre de gravetat en la disposició 1 del tren de potència.

La posició del centre de massa en aquesta disposició del tren de potència és la següent (Figura 5.3, dades en mm):

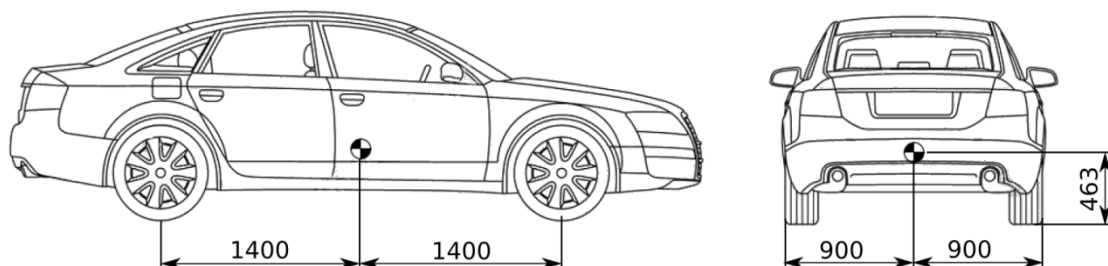


Figura 5.3: posició del centre de gravetat del turisme en la disposició 1 del tren de potència.

## Resistència inercial rotativa

La resistència inercial ve donada per l'acceleració de les parts rotatives del vehicle. En accelerar o desaccelerar, el canvi d'energia cinètica del vehicle no és només en l'energia lineal, sinó que les parts connectades mecànicament amb la superfície de circulació també es veuen afectades. Els components mòbils del tren de potència com els eixos, la transmissió i el motor també formen part de l'energia cinètica del vehicle en circulació. Aquests s'han de tenir en compte en l'energia cinètica de rotació.

La força deguda a la resistència inercial s'expressa com: [13]

$$F = m \cdot a \rightarrow RI = m_{equivalent} \cdot a \quad ; \quad on: \quad (5.2)$$

$$m_{eq.} = I_{roda} \cdot \left(\frac{1}{r_{roda}}\right)^2 + I_{motor+transmissió} \cdot \eta_{mot.+trans.} \cdot \left(\frac{\tau}{r_{roda}}\right)^2 \quad (5.3)$$

L'expressió de la resistència inercial rotativa per a la configuració del tren de potència és:

$$F_{RI} \equiv RI = \left(2,7 \cdot \left(\frac{1}{0,35}\right)^2 + 0,5 \cdot 0,97 \cdot \left(\frac{9}{0,35}\right)^2\right) \cdot a = 342,73 \cdot a \quad [N] \quad (5.4)$$

## Resistència de rodolament

El model teòric d'una roda és un cilindre perfecte, el qual només es recolza sobre la superfície de rodolament amb una línia. A la realitat no existeixen aquestes formes perfectes i apareixen resistències passives que dificulten el moviment.

Les rodes d'un turisme estan formades per la llanda i el pneumàtic. Entre d'altres, els avantatges d'utilitzar un pneumàtic a base de cautxú com a superfície de contacte entre el vehicle i el terra és el de tenir un bon coeficient de fricció.

El fet d'utilitzar un material flexible i elàstic provoca que el contacte amb el terra no sigui una línia, sinó una àrea. L'efecte sobre el rodolament és que genera un parell de rodolament que s'ha de vèncer per posar el vehicle en moviment quan el vehicle està aturat i s'ha de seguir aplicant si no es vol que el vehicle s'aturi.

Tot i que varia amb la velocitat, s'agafarà una aproximació de la resistència al rodolament amb l'expressió 5.5: [13]

$$RR = C_{rr} \cdot N \quad ; \quad on: \quad (5.5)$$

$C_{rr}$ : coeficient de resistència de rodament. Per a una superfície dura, com l'asfalt, és 0,02. En superfícies toves com la sorra és 0,3. En condicions normals el cotxe es trobarà en asfalt, així que s'agafarà el primer valor per fer els càlculs. [14]

N: força normal.

Tot i que el vehicle tingui acceleració, sabent que això modifica la força normal que suporta cada eix, no es tindrà en compte. Si es considera una acceleració constant, l'increment de força normal en un eix es veu compensat per la disminució d'aquesta en l'altre, contrarestant-ne així l'efecte. Això és degut a que el cotxe no té acceleració en la direcció perpendicular al pla de rodament, tenint en compte una superfície plana.

L'expressió numèrica de la força de rodament per a la disposició és:

$$F_{RR} \equiv RR = 0,02 \cdot N = 0,02 \cdot mg = 0,02 \cdot 1995,8 \cdot 9,81 = 390,59 \text{ N}$$

### Acceleració lineal de 0 a 100 km/h

Els factors limitants de l'acceleració d'un vehicle terrestre de propulsió per contacte són la potència del sistema propulsor i l'adherència de les parts tractores amb la superfície. En aquest cas, l'acceleració del turisme estarà limitada per dos factors: (1) la potència i parell que pot exercir el motor sobre les rodes; (2) l'adherència dels pneumàtics amb la superfície de circulació.

Com el turisme en aquesta disposició té tracció davantera l'adherència dels pneumàtics estarà més compromesa, com es veurà a continuació.

Amb el vehicle aturat (velocitat 0) l'acceleració màxima ve donada per la força que el motor pot exercir per fer avançar el turisme. El parell d'arrencada màxim del motor sobre l'eix de les rodes és:

(En aquesta disposició, la relació de transmissió és  $\tau=9$ )

$$\Gamma_{motor \rightarrow rodes} = \tau \cdot \Gamma_{motor} = 9 \cdot 350 = 3150 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.6)$$

Per tant, la força que exerceix la roda sobre el terra i la força amb què es propulsa el vehicle és:

$$F_{propulsió} = \frac{\Gamma_{motor \rightarrow rodes}}{r} = \frac{3150}{0,35} = 9000 \text{ N} \quad (5.7)$$

Aplicant la segona Llei de Newton calculem l'acceleració del cotxe en l'arrencada. El càlcul es realitza amb el pes del vehicle en ordre de marxa, tenint en compte un conductor de 75 kg.

La resultant de forces, que és la força que donarà l'acceleració del vehicle en l'aturada ( $F_{a0}$ ), és la següent:

$$F_{a0} = F_{prop.} - F_{RR} - F_{RI} - F_D \rightarrow F_{a0} = m \cdot a \quad (5.8)$$

(Amb  $v=0$ ,  $F_D=0$  si no hi ha vent, és a dir, la velocitat del flux d'aire que incideix sobre el cotxe és 0 si aquest està aturat.)

$$9000 - 390,59 - 342,73 \cdot a = 1995,8 \cdot a \rightarrow a_{0 \text{ km/h}} = 3,68 \text{ m/s}^2$$

Com s'ha vist anteriorment, el motor elèctric de tracció del tren de potència té unes limitacions de parell i velocitat angular. El parell considerat en l'acceleració en l'arrencada és el parell màxim que pot fer el motor. A mesura que augmenti la velocitat el motor no podrà donar el màxim parell perquè estarà arribant al límit de potència.

Amb els paràmetres coneguts, es pot calcular l'acceleració del cotxe. S'han de tenir en compte dos trams. Per calcular l'acceleració a una velocitat diferent de 0, però sobretot al tram 2, s'haurà de tenir en compte la força de resistència aerodinàmica. Com s'ha calculat anteriorment,  $F_D = 0,3238 \cdot v^2$ .

$$(0) \quad \Gamma_{motor} = 350 \text{ N} \cdot \text{m}; F_0 = 9000 \text{ N}; \quad a_0 = 3,68 \text{ m/s}^2, \text{ ja calculat.}$$

$$(1) \quad P_{motor} = 160 \text{ kW}, \quad \Gamma_{motor} = 350 \text{ N} \cdot \text{m}; \text{ Fins a quina velocitat podrà donar parell màxim?}$$

$$(2) \quad P_{motor} = 160 \text{ kW}; \quad v_{cotxe} = 100 \text{ km/h} \text{ Amb la limitació de potència, quina serà l'acceleració?}$$

Tram (1): de  $0 \text{ m/s}$  a  $17,7 \text{ m/s} = 64 \text{ km/h}$

Quina és la velocitat a la qual el parell es redueix? ( $P_{m\grave{a}x} = 160 \text{ kW}$ )

$$P_{m\grave{a}x} = F_{prop.} \cdot v \rightarrow v = \frac{P_{m\grave{a}x}}{F_{prop.}} = \frac{160.000}{9000} = 17,7 \text{ m/s} \text{ (64 km/h)} \quad (5.9)$$

a aquesta velocitat, la força resultant d'avanç sobre el cotxe és:

$$F_{a1} = 7345 - 0,3238 \cdot v^2 \rightarrow \begin{cases} v_0 = 0; F_{a0} = 7345 \text{ N} \\ v_1 = 17,7 \text{ m/s}; F_{a1} = 7242,7 \text{ N} \end{cases} \quad (5.10)$$

L'acceleració mitjana del turisme al tram 1 és:

$$F = m \cdot a \rightarrow \bar{a}_1 = \frac{F_{a1}(v)}{m} = \frac{1}{\Delta v_{tram 1}} \cdot \int_{v_0}^{v_1} F_{a1} dv = \frac{1}{\Delta v_{tram 1} \cdot m} \cdot \int_{v_0}^{v_1} F_{a1} dv \quad (5.11)$$

$$\bar{a}_1 = \frac{1}{(17,7 - 0) \cdot 1995,8} \cdot \int_0^{17,7} (7345 - 0,3238 \cdot v^2) dv = 3,66 \text{ m/s}^2$$

Tram (2): de  $17,7 \text{ m/s}^2$  a  $27,7 \text{ m/s} = 100 \text{ km/h}$

La força que fa el motor amb la limitació de potència és:

$$P = F \cdot v \rightarrow F = \frac{P}{v} \rightarrow F_{prop.,2} (+17,7 \text{ m/s}) = \frac{P}{v} = \frac{160.000}{v} \quad (5.12)$$

Amb la resta de resistències, la força resultant sobre el vehicle és:

$$F_{a2} = F_{prop.,2} - F_{RR} - F_{RI} - F_{D,2} = m \cdot a_2 \quad (5.13)$$

$$F_{a2} = \frac{P}{v} - F_{RR} - m_{eq.} \cdot a_2 - f_D \cdot v^2 = m \cdot a_2$$

Els termes es poden arranjar de la següent manera:

$$F'_{a2} = \frac{P}{v} - F_{RR} - f_D \cdot v^2 = (m + m_{eq.}) \cdot a_2 \quad (5.14)$$

L'acceleració mitjana del tram 2 ( $17,7 \div 27,7 \text{ m/s}$ ) deguda a  $F_{a2}$  que actua sobre el vehicle és:

$$a \equiv a_2 = \frac{\overbrace{\frac{P}{v} - F_{RR} - f_D \cdot v^2}^{F'_{a2}}}{m + m_{eq.}}$$

$$F = m \cdot a \rightarrow \bar{a}_2 = \frac{1}{\Delta v_{tram\ 2} \cdot (m + m_{eq.})} \cdot \int_{v_1}^{v_2} F'_{a2} dv \quad (5.15)$$

$$\bar{a}_2 = \frac{1}{(27,7 - 17,7)(1995,8 + 342,73)} \cdot \int_{17,7}^{27,7} \left( \frac{160.000}{v} - 390,59 - 0,3238 \cdot v^2 \right) dv$$

$$\bar{a}_2 = 2,81 \text{ m/s}^2$$

Un cop calculades des acceleracions, es pot determinar el temps que tardarà el vehicle a accelerar de 0 a 100 km/h utilitzant tota la potència disponible.

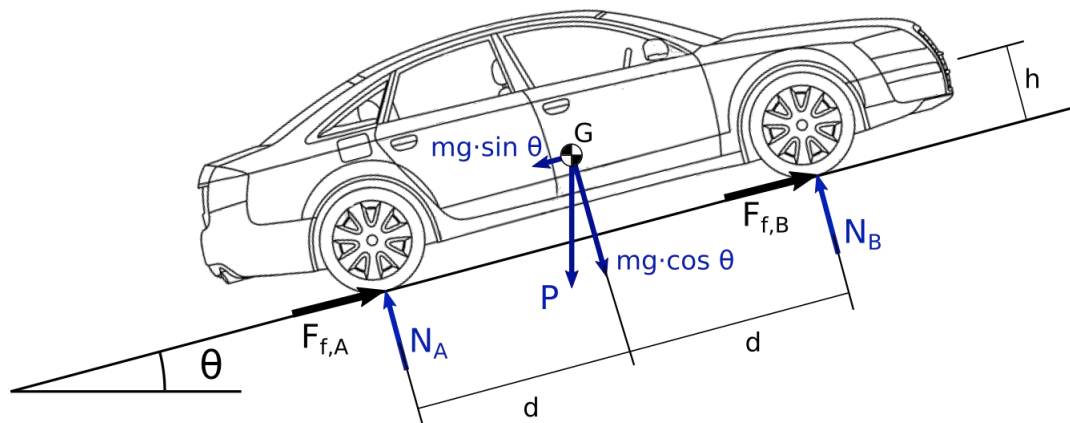
Tram	Velocitat [m/s] (km/h)	Acceleració mitjana (m/s <sup>2</sup> )	Temps (s)	Distància recorreguda (m)
1	0 – 17,8 (64)	3,66	4,86	43,2
2	17,8 – 27,8 (100)	2,81	3,56	85,6
TOTAL	0 – 27,8 (100)	3,10	8,42	128,8

**Taula 5.7: càlculs de distància, temps i acceleració mitjana del vehicle amb el tren de potència en la disposició 1.**

El temps que tarda el turisme en accelerar de 0 a 100 km/h són 8,42 s fent ús de la potència màxima que pot donar el motor (160 kW). Aquesta potència no és la nominal, així que no la pot proporcionar de manera sostinguda.

### Inclinació màxima en acceleració

En aquesta disposició s'estudia el cas del motor i eix motriu adjacents, tant si estan situats a l'eix davanter del vehicle com a l'eix posterior. En una pendent si el vehicle té tracció davantera es podria perdre l'adherència a de les rodes motrius més fàcilment. El diagrama de forces del cotxe en una pendent és:



**Figura 5.4: diagrama de forces del turisme en un pendent ascendent.**

S'agafa la situació de lliscament iminent ( $F_f = \mu \cdot N$ ,  $\mu = 1$ ):

$$\begin{cases} \sum F_x = m \cdot a_{m\grave{a}x.} & ; & F_{f,A} + F_{f,B} - mg \cdot \sin \theta = m \cdot a_{m\grave{a}x.} \\ \sum F_z = 0 & ; & N_A + N_B - mg \cdot \cos \theta = 0 \\ \sum M_{(y)}(G) = 0 & ; & (F_{f,A} + F_{f,B}) \cdot h + (N_B - N_A) \cdot d = 0 \end{cases} \quad (5.16)$$

d'on s'extreu:

$$\begin{cases} N_A + N_B - mg \sin \theta = m \cdot a_{m\grave{a}x.} \\ N_B = mg \cdot \cos \theta - N_A \\ (N_A + N_B)h + (N_B - N_A)d = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} N_A + mg \cos \theta - N_A - mg \cdot \sin \theta = m \cdot a_{m\grave{a}x.} \\ a_{m\grave{a}x.} = g \cdot (\cos \theta - \sin \theta) \\ N_A = \frac{N_B + mgh \cdot \cos \theta}{d} \end{cases}$$

Tant si un vehicle terrestre propulsat amb rodes té tracció davantera, posterior o a totes les rodes, l'acceleració màxima en terreny pla ( $\theta=0^\circ$ ) no podrà superar 1g, és a dir,  $9,81 \text{ m/s}^2$ . El factor limitant és l'adherència dels pneumàtics a la superfície de rodament.

Si el motor apliqués un parell el qual causés (virtualment) una acceleració més gran que 1g, patinarien les rodes i s'aconseguiria una acceleració menor que si s'hagués mantingut la tracció.

Si la tracció és davantera, el cas més desfavorable, la inclinació màxima a què pot accelerar el cotxe utilitzant tot el parell disponible és:

$$F_{f,B} = F_{motor \rightarrow rodes} = \mu \cdot N_B \rightarrow N_B = 9000 \text{ N}$$

$$\begin{cases} N_B = mg \cdot \cos \theta - N_A \\ N_A = \frac{N_B + mgh \cdot \cos \theta}{d} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} N_B = mg \cdot \cos \theta - \frac{N_B + mgh \cdot \cos \theta}{d} \\ \cos \theta = \frac{N_B \cdot \left(1 - \frac{1}{d}\right)}{mg \cdot (1 + h)} \end{cases} \quad (5.17)$$

$$\cos \theta = \frac{9000 \cdot \left(1 - \frac{1}{1,4}\right)}{1995,8 \cdot (1 + 0,463)} = 0,88 \rightarrow \theta = 28,3^\circ$$

Fins a  $28^\circ$  d'inclinació el vehicle podrà accelerar amb tot el parell que el motor pot produir sense que les rodes motrius (davanteres) perdin adherència.

### Acceleració lateral màxima

En un canvi de direcció, seguint la primera llei de Newton, el vehicle tendeix a seguir en la direcció que duia abans que s'apliqués la força. La "resistència" a canviar de direcció dependrà de la inèrcia del vehicle. A més, la força de canvi de direcció estarà limitada per dos factors: pel fregament entre el pneumàtic i l'asfalt i pel bolcament del cotxe, ja que la força no s'aplica al centre de gravetat, sinó en un punt inferior.

Fent un estudi dinàmic del turisme en una corba, es consideren els dos casos:

Cas 1: Fallada per tracció. L'acceleració lateral del vehicle és tan gran que supera la força de fregament entre el pneumàtic i la superfície de rodament, la qual cosa causa que el vehicle es desviï de la trajectòria circular.

Tenim en compte la força de fregament màxima:  $F_{f,màx} = \mu \cdot N = m \cdot a_{lateral}$

$$N = m \cdot g \rightarrow \mu \cdot m \cdot g = m \cdot a_{lateral} \rightarrow a_{lateral} = \mu \cdot g \quad (5.18)$$

$$\mu_{asfalt} = 1, \rightarrow a_{lateral} = g = 9,81 \text{ m/s}^2$$



El valor numèric de  $F_{f,màx}$  és:  $F_{f,màx} = 1 \cdot 1995,8 \cdot 9,81 = 19579 \text{ N}$

Cas 2: Fallada per bolcament. Com s'ha esmentat, la força de fregament s'aplica entre el pneumàtic i l'asfalt. En canvi, el centre de massa és a una certa alçada sobre el terra i està experimentant una acceleració centrípeta causada per la força de fregament (si se suposa que està seguint la trajectòria radial). Aquest desalineament entre les dues forces crea un parell, contrarestat pel pes, que podria fer bolcar el vehicle.

L'acceleració lateral màxima que pot suportar el vehicle són  $9,81 \text{ m/s}^2$  (i.e.  $1g$ ).

Tenint en compte aquesta acceleració màxima produïda per la força de fregament màxima, el diagrama de forces és el següent:

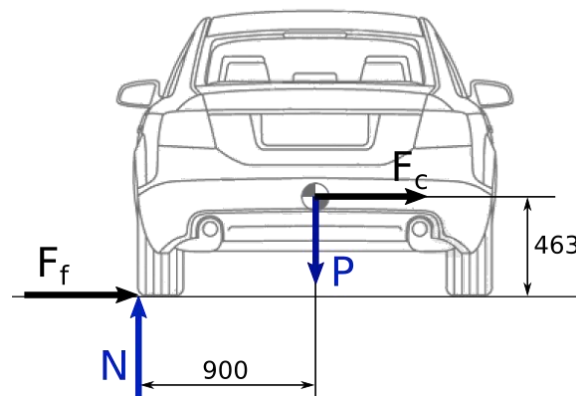


Figura 5.5: diagrama de forces del turisme en realitzar un canvi de direcció en un pla horitzontal.

S'agafa la situació de bolcament imminent:

$$\begin{cases} \sum F_x = m \cdot a & ; & F_f = m \cdot a_{\text{centrípeta}} = F_{\text{centr}} \\ \sum F_y = 0 & ; & N = P \rightarrow N = m \cdot g \\ \sum M_{(z)}(O) = 0 & ; & F_f \cdot 0,463 - P \cdot 0,900 = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{aligned} a_{\text{centrípeta}} &= \frac{F_f}{m} \\ F_f &= \frac{0,900 \cdot m \cdot g}{0,463} \end{aligned} \quad (5.19)$$

D'aquí (5.19) s'extreu l'acceleració centrípeta:

$$a_{\text{centrípeta}} = \frac{\frac{0,900 \cdot m \cdot g}{0,463}}{m} = \frac{0,900}{0,463} \cdot g \cong 1,9g$$

En el segon cas l'acceleració per bolcar el cotxe és superior a l'acceleració de lliscament. Per tant, el cotxe arribarà a la situació de pèrdua d'adherència

abans d'arribar a la situació de bolcada i per tant, en condicions normals, mai podrà bolcar realitzant aquesta maniobra.

Les proves d'acceleració lateral fora d'una centrifugadora normalment es realitzen en una pista circular estàndard 100 metres de radi (norma ISO 4138). La velocitat màxima que podria assolir el cotxe en la disposició estudiada és:

$$a_{centrípeta} = 1g = \frac{v^2}{R} \rightarrow v = \sqrt{g \cdot R} = \sqrt{9,81 \cdot 100} = 31,32 \text{ m/s} \approx 113 \text{ km/h} \quad (5.20)$$

Cal esmentar que en aquests càlculs no s'ha tingut en compte la força aerodinàmica sobre el cotxe. La càrrega aerodinàmica podria variar la força normal, canviant així l'adherència i l'acceleració centrípeta màxima.

### Velocitat màxima

La velocitat màxima es pot obtenir igualant la derivada de la funció velocitat a 0. L'expressió que es necessita ja ha estat calculada anteriorment (5.13), que és:

$$F_{a2} = F_{prop,2} - F_{RR} - F_{RI} - F_{D,2} = m \cdot a_2 \quad (\text{al tram 2})$$

$$a_2 = \frac{\frac{P}{v} - F_{RR} - f_D \cdot v^2}{m + m_{eq.}} \rightarrow \frac{\frac{P}{v} - F_{RR} - f_D \cdot v^2}{m + m_{eq.}} = 0 \quad \text{Substituint els valors:} \quad (5.21)$$

$$\frac{\frac{160.000}{v} - 342,73 - 0,3238 \cdot v^2}{1995,8 + 390,59} = 0 \rightarrow \begin{cases} v_1 = 74,60 \text{ m/s} \\ v_2 = -37,30 + 72,34 \cdot i \\ v_3 = -37,30 - 72,34 \cdot i \end{cases}$$

La velocitat obtinguda, 74,6 m/s (269 km/h) és la velocitat teòrica màxima que podria assolir el turisme amb les condicions de potència donades. Tanmateix, els coixinets de les parts mòbils del tren de potència tenen una velocitat màxima de gir de 12.000 rpm.

$$12.000 \text{ rpm} \cdot \frac{1}{9} \cdot \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rpm}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot 0,35 \text{ m} = 48,87 \text{ m/s} \approx 176 \text{ km/h}$$

Per tant, tot i que el motor tingui potència suficient com per propulsar el cotxe fins a assolir 266 km/h, els coixinets dels eixos tenen una velocitat de gir màxima de 12.000 rpm i limiten la velocitat màxima del turisme a 176 km/h.

Com que la velocitat no està limitada per potència, si s'alimenta el motor contínuament el vehicle seguirà accelerant més enllà de la velocitat màxima de gir que poden suportar els coixinets. S'haurà de posar un limitador electrònic per evitar que s'excedeixi aquesta velocitat.

## Autonomia

Com s'ha vist, l'autonomia del vehicle ve donada per diversos factors, però a partir dels que s'han fixat (carrosseria, suspensió i direcció, potència, sistemes auxiliars...) es veurà la influència del tren de potència.

Agafant les dades de consum, s'introdueix el pes del vehicle en l'expressió (A.2) per obtenir les necessitats energètiques. El turisme en la disposició de tren davanter té una massa total d'ordre de marxa de 1995,8 kg. Les necessitats energètiques són:

$$e [km/kWh] = -0,001738 \cdot 1995,8 + 8,17 = 4,7 km/kWh$$

$$\frac{1}{e} = 0,213 kW/km$$

El turisme en aquesta disposició té una bateria de 117 kW·h, del quals només en són aprofitables un 95% (111 kW·h), ja que hi ha marges de seguretat per evitar sobrecàrregues o descàrregues excessives. A més, els sistemes auxiliars del vehicle consumeixen 2 kW. Considerant que funcionen un 40 % dels sistemes simultàniament, s'estableix un consum de 800 W. En unes 6h de conducció s'hauran consumit 4,8 kW·h. Amb les necessitats energètiques del vehicle es determina l'autonomia:

$$(111 - 4,8) kWh \cdot 0,8 \cdot \frac{4,7 km}{1 kWh} \approx 400 km$$

### 5.1.4. Resum de la disposició 1: motor i eix motriu adjacents

Característiques generals	
Tracció	Davantera
Pes	1921 kg
Velocitat màxima	176 km/h (limitat)
Potència	100 kW (134 cv)
Potència màxima	160 kW (214 cv)
Acceleració 0 – 100 km/h	8,42 s
Autonomia	400 km
Característiques del tren de potència	
Motor	Trifàsic de CA
Potència	100 kW (134 cv)
Parell	350 N·m
Revolucions màx. motor	12.000 rpm
Bateria (ions de liti)	10.600 cel·les de 3,7V
Refrigeració	Líquid refrigerant
Capacitat de la bateria	117 kW·h
Potència nominal bateria (en descàrrega)	120 kW
Convertidor	Inversor bidireccional
Potència del convertidor	110 kW
Pes de la bateria	504 kg
Pes del tren de potència	624 kg

Taula 5.8: característiques de la disposició 1 del tren de potència.

- Bateria
- Electrònica de potència
- Motor
- Espai per altres sistemes del vehicle

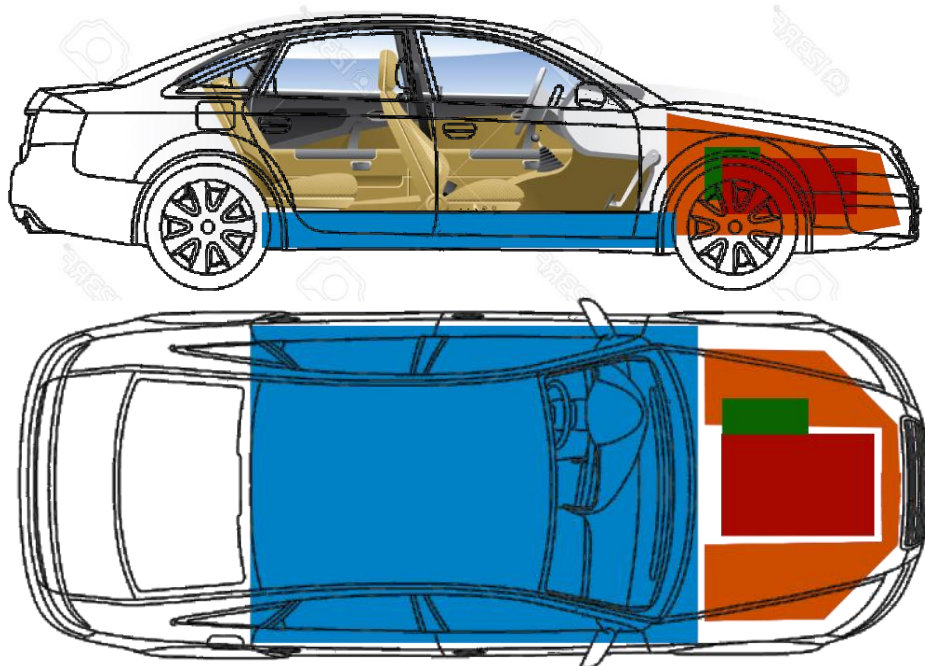


Figura 5.6: disposició dels elements del tren de potència en la disposició 1, exclouent els eixos.

## 5.2. Tracció a les 4 rodes

### 5.2.1. Descripció general

Cada vegada són més comunes les disposicions amb tracció a les 4 rodes en turismes. Els cotxes dotats d'aquestes disposicions ofereixen un bon control en situacions on l'adherència és pobre, ja sigui durant una conducció agressiva o quan les condicions de la carretera són desfavorables.

En aquesta disposició el vehicle es propulsarà amb els dos eixos. Si el motor i l'eix tractor no estan al mateix lloc (davant o darrere) cal transmetre l'energia des de la part davantera a l'eix de darrere o viceversa. En els vehicles de tracció posterior amb motor davanter s'utilitza un eix de transmissió per connectar el grup tractor davanter (motor i canvi de marxes) amb l'eix posterior.

L'arbre de transmissió porta implícites les pèrdues de qualsevol sistema físic real, la qual cosa redueix l'eficiència de la transmissió. Com que s'està cercant aconseguir la màxima eficiència del tren de potència, s'intentarà reduir al màxim el nombre de mecanismes necessaris per transmetre el moviment.

Els elements d'aquest tren de potència són els següents:

#### Bateria

Cel·les	Dimensions aproximades (m)	Massa (kg)	Capacitat
10600	1,3x0,1x1.8 (0,234 m <sup>3</sup> )	504	117 kW·h

Taula 5.9: dades de la bateria d'ions de liti en la disposició 2 del tren de potència.

#### Motor

Tipus	Dimensions aproximades(m)	Massa (kg)	Potència nominal	Potència màxima	Parell màxim
Síncron CA	Ø0,4x0,6	100 <sup>2</sup>	100 kW	160 kW	350 N·m

Taula 5.10: dades del motor síncron de corrent alterna amb imants permanents utilitzat en la disposició 2 del tren de potència.

#### Electrònica de potència

Tipus	Dimensions aproximades(m)	Massa (kg)	Potència nominal
Inversor de tracció bidireccional	0,4x0,4x0,2 (0,032 m <sup>3</sup> )	20	110 kW

Taula 5.11: dades de l'inversor de tracció bidireccional de la disposició 2 del tren de potència.

<sup>2</sup> amb sistema refrigerant. En aquesta disposició també és necessari un refrigerant per evacuar la calor generada al motor i a l'inversor.

### Arbre de transmissió i diferencials addicionals

Tipus	Rendiment de la transmissió	Massa (kg)
Arbre de transmissió, 2 diferencials amb biaix de parell i paliers addicionals	0,96	100

Taula 5.12: dades de la transmissió de la disposició 2. [11]

### 5.2.2. Balanç energètic

L'energia continguda a la bateria es transforma a energia cinètica durant la propulsió. En frenada regenerativa l'energia flueix en sentit contrari.

### Flux d'energia

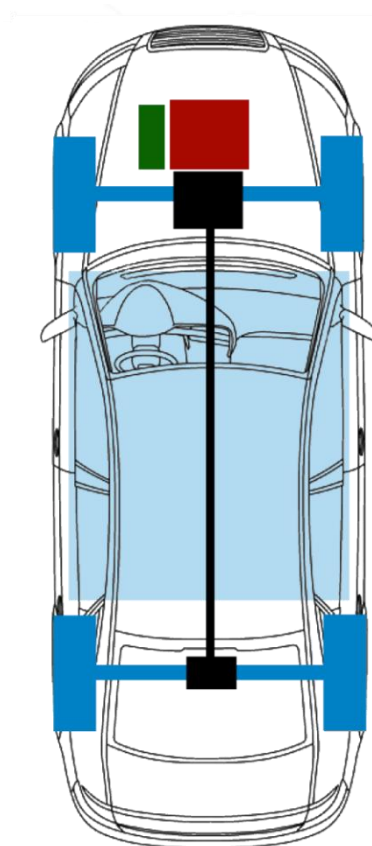
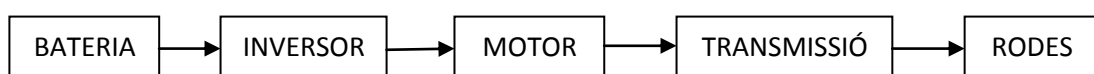
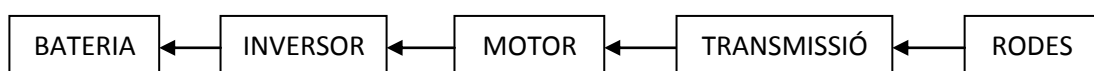


Figura 5.7: esquema general del tren de potència en la disposició amb tracció a 4 rodes i un sol motor. En blau hi ha marcades les parts que són motrius. El moviment del motor es transmet a l'eix posterior mitjançant un arbre de transmissió.

Propulsió:



Frenada regenerativa:



	Bateria	Inversor	Motor	Transmissió	Rodes	$\eta$ total
Eficiència	0,99	0,95	0,94	0,97·0,96	0,94	0,77

**Taula 5.13: eficiència (rendiment energètic) dels elements de la disposició 2 del tren de potència.**

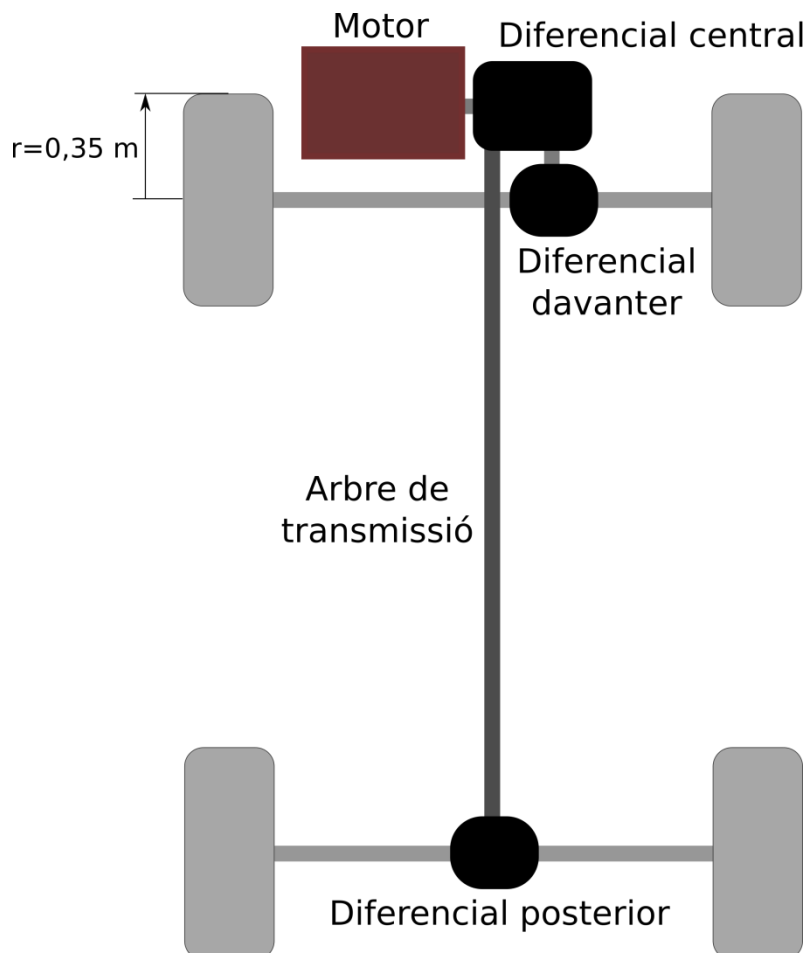
Les pèrdues ocasionades per els components addicionals en la transmissió redueixen l'eficiència del turisme en la disposició amb tracció a les 4 rodes fins al 77%, lleugerament menor que en la disposició anterior.

### Refrigeració

Com en la disposició anterior, l'energia que s'ha de dissipar a la bateria, al motor i a l'inversor en estat estacionari són les pèrdues per efecte Joule.

### 5.2.3. Dinàmica del vehicle

Totes les rodes són motrius en aquesta disposició. Per tant, cal transmetre el moviment del motor a totes les rodes. Per fer-ho, s'introdueixen dos diferencials amb biaix de parell. Aquesta disposició és especialment recomanada per a turismes que circularan en condicions d'adherència desfavorables, com en carreteres sense pavimentar, en cas de pluja intensa, neu o gel. La relació de transmissió ( $\tau$ ) entre el motor i l'eix (palier) de les rodes segueix sent d'1:9.



**Figura 5.8: esquema de la part propulsora del tren de potència.**

En aquesta disposició el moviment del motor es transmet en primera instància al diferencial central, el qual reparteix el parell entre l'eix davanter i l'eix posterior. En condicions normals, és comú que un diferencial central divideixi el parell entre els eixos amb una proporció de 50:50, que és la que es considerarà per l'estudi. Aquesta proporció pot canviar en cas que les rodes d'un dels eixos perdin tracció. Com que es tracta d'un diferencial amb biaix de parell, si es donés el cas que un eix perd tracció el diferencial transmetria el parell a les rodes amb tracció. La mateixa situació és extrapolable a la pèrdua de tracció d'una de les rodes d'un eix: el parell es transmetria a la roda de l'eix que té tracció.

### Posició del centre de massa

La disposició amb tracció a totes les rodes porta associada un augment de pes degut als mecanismes de transmissió que cal incorporar al vehicle. No obstant això, pel que fa a la posició z del centre de massa no és un desavantatge, ja que els elements que s'afegeixen estan situats a la part inferior del vehicle.

Tenint en compte els càlculs realitzats a la taula, el centre de massa resultant és:

Component	Massa (kg)	Posició z de G (m)
Cotxe sense tren de potència	1296,8	0,53
Bateria	504	0,30
Motor	100	0,40
Inversor	20	0,50
Transmissió addicional	100	0,35
TOTAL	2020,8	0,457

Taula 5.14: centre de gravetat en la disposició 2 del tren de potència.

La posició del centre de massa en aquesta disposició del tren de potència és la següent: (dades en mm)

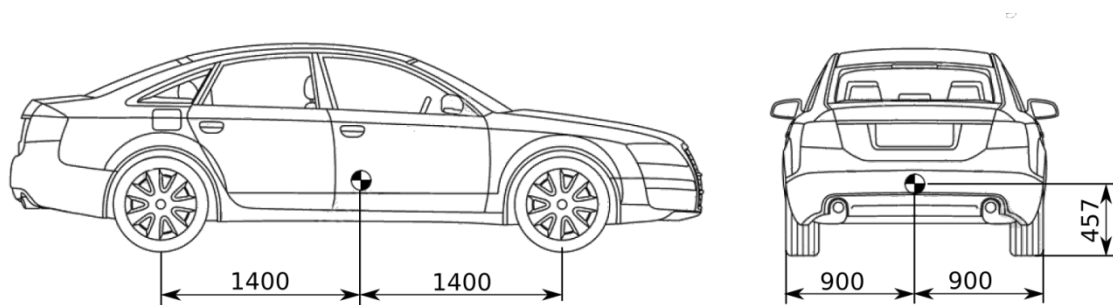


Figura 5.9: posició del centre de gravetat en la disposició 2 del tren de potència.



### Resistència inercial rotativa

En la tracció a les 4 rodes hi ha molts més elements amb inèrcies de rotació. En aquest cas, els components que contribueixen a la inèrcia rotativa són: motor, diferencial central, arbre de transmissió i paliers, 2 diferencials dels eixos davanter i posterior. Es negligirà la inèrcia de l'arbre de transmissió i dels paliers, ja que és molt petita ( $0,0125 \text{ kg/m}^2$ ) en comparació a les altres inèrcies.

La força deguda a la resistència inercial s'expressa com:

$$I_{\text{motor} + \text{transmissió}, \text{Disp.2}} = I_{\text{motor} + \text{transmissió}, \text{Disp.1}} + 2 \cdot I_{\text{Diferencial}} \quad (5.22)$$

$$I_{\text{motor} + \text{transmissió}, \text{Disp.2}} = 0,5 + 2 \cdot 0,075 = 0,65$$

Per tant, la massa equivalent total del vehicle és:

$$m_{eq.} = I_{\text{roda}} \cdot \left(\frac{1}{r_{\text{roda}}}\right)^2 + I_{\text{motor} + \text{transmissió}} \cdot \eta_{\text{mot.} + \text{trans.}} \cdot \left(\frac{\tau}{r_{\text{roda}}}\right)^2 \quad (5.23)$$

La resistència inercial rotativa per aquesta configuració del tren de potència és:

$$F_{RI} \equiv RI = \left(2,7 \cdot \left(\frac{1}{0,35}\right)^2 + 0,65 \cdot 0,97 \cdot 0,96 \cdot \left(\frac{9}{0,35}\right)^2\right) \cdot a = 422,27 \cdot a \quad [N]$$

### Resistència de rodament

Com s'ha augmentat lleugerament el pes del turisme, també augmentarà la força normal en el mateix valor. Alhora, com la resistència al rodament depèn de la força normal, també augmentarà.

Agafant l'aproximació de la resistència al rodament (5.5), es té:

$$RR = C_{rr} \cdot N \quad ; \quad \text{on:}$$

$$F_{RR} \equiv RR = 0,02 \cdot N = 0,02 \cdot mg = 0,02 \cdot 2090,8 \cdot 9,81 = 410,21 \text{ N}$$

### Acceleració lineal de 0 a 100 km/h

En un turisme amb tracció a les 4 rodes els factors limitants de l'acceleració són l'adherència dels pneumàtics a la carretera i la potència del motor. A efectes pràctics, però, l'únic factor limitant serà la potència del motor. Tenint en compte el repartiment de parell dels diferencials, si les rodes davanteres perden tracció per efecte de l'acceleració les rodes posteriors en tindran amb gairebé tota seguretat.

Com que el cotxe té el mateix motor i la mateixa relació de transmissió, el parell d'arrencada màxim del motor sobre l'eix de les rodes és igual que en la disposició anterior:

(La relació de transmissió és  $\tau=9$ )

$$\Gamma_{motor \rightarrow rodes} = \tau \cdot \Gamma_{motor} = 9 \cdot 350 = 3150 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Per tant, la força que exerceix la roda sobre el terra i la força amb què es propulsa el vehicle segueix sent 9000 N:

$$F_{propulsió} = \frac{\Gamma_{motor \rightarrow rodes}}{r} = \frac{3150}{0,35} = 9000 \text{ N}$$

Aplicant la segona Llei de Newton calculem l'acceleració màxima del vehicle en ordre de marxa. Així doncs cal afegir el pes del conductor, 75 kg.

La resultant de forces, és:

$$F_{a0} = F_{prop.} - F_{RR} - F_{RI} - F_D \rightarrow F_{a0} = m \cdot a$$

(Amb  $v=0$ ,  $F_D=0$  si no hi ha vent, és a dir, la velocitat del flux d'aire que incideix sobre el cotxe és 0 si aquest està aturat.)

$$9000 - 410,21 - 422,27 \cdot a = 2095,8 \cdot a \rightarrow a_{0 \text{ km/h}} = 3,41 \text{ m/s}^2$$

Amb les limitacions de parell i velocitat angular que té el motor, es calcularà l'acceleració en els 2 trams: limitació de parell (1) i de potència (2), com en la disposició anterior. La resistència aerodinàmica no varia i com s'ha calculat anteriorment,  $F_D = 0,3238 \cdot v^2$ .

$$(0) \quad \Gamma_{motor} = 350 \text{ N} \cdot \text{m}; F_0 = 9000 \text{ N}; \quad a_0 = 3,41 \text{ m/s}^2, \text{ ja calculat.}$$

$$(1) \quad P_{motor} = 160 \text{ kW}, \quad \Gamma_{motor} = 350 \text{ N} \cdot \text{m}; \text{ Fins a quina velocitat podrà donar parell màxim?}$$

$$(2) \quad P_{motor} = 160 \text{ kW}; \quad v_{cotxe} = 100 \text{ km/h} \text{ Amb la limitació de potència, quina serà l'acceleració?}$$

Tram (1): de  $0 \text{ m/s}$  a  $17,7 \text{ m/s} = 64 \text{ km/h}$

Seguint el mateix procediment, com en la disposició 1:

$$F_{a1} = 7150 - 0,3238 \cdot v^2 \rightarrow \begin{cases} v_0 = 0; F_{a0} = 7150 \text{ N} \\ v_1 = 17,7 \text{ m/s}; F_{a1} = 7047,5 \text{ N} \end{cases} \quad (5.24)$$

L'acceleració mitjana del turisme també es veurà afectada pel canvi de massa.

L'acceleració al tram 1 és:

$$\bar{a}_1 = \frac{1}{(17,7 - 0) \cdot 2095,8} \cdot \int_0^{17,7} (7150 - 0,3238 \cdot v^2) dv = 3,40 \text{ m/s}^2$$

Tram (2): de  $17,7 \text{ m/s}^2$  a  $27,7 \text{ m/s} = 100 \text{ km/h}$

La força que fa el motor amb la limitació de potència és:

$$P = F \cdot v \rightarrow F = \frac{P}{v} \rightarrow F_{prop.,2} (+17,7 \text{ m/s}) = \frac{P}{v} = \frac{160.000}{v}$$

Amb la resta de resistències, la força resultant sobre el vehicle és:

$$F_{a2} = F_{prop.,2} - F_{RR} - F_{RI} - F_{D,2} = m \cdot a_2$$

$$F_{a2} = \frac{P}{v} - F_{RR} - m_{eq.} \cdot a - f_D \cdot v^2 = m \cdot a_2$$

$$F'_{a2} = \frac{P}{v} - F_{RR} - f_D \cdot v^2 = (m + m_{eq.}) \cdot a_2$$

L'acceleració mitjana del tram 2 ( $17,7 \div 27,7 \text{ m/s}$ ) deguda a  $F_{a2}$  és:

$$a \equiv a_2 = \frac{F'_{a2}}{m + m_{eq.}}$$

$$\bar{a}_2 = \frac{1}{(27,7 - 17,7)(2095,8 + 422,27)} \cdot \int_{17,7}^{27,7} \left( \frac{160.000}{v} - 410,21 - 0,3238 \cdot v^2 \right) dv$$

$$\bar{a}_2 = 2,61 \text{ m/s}^2$$

Amb les acceleracions, es pot determinar el temps que tardarà el vehicle a accelerar de 0 a 100 km/h:

Tram	Velocitat [m/s] (km/h)	Acceleració mitjana (m/s <sup>2</sup> )	Temps (s)	Distància recorreguda (m)
1	0 – 17,8 (64)	3,40	5,23	46,5
2	17,8 – 27,8 (100)	2,61	3,83	87,3
TOTAL	0 – 27,8 (100)	2,88	9,06	133,8

Taula 5.15: càlculs de distància, temps i acceleració mitjana del vehicle amb el tren de potència en la disposició 2.

El temps que tarda el turisme en accelerar de 0 a 100 km/h són 9,06 s sobrecarregant el motor (160 kW) durant un interval curt de temps.

### Inclinació màxima en acceleració

Com la tracció és a les 4 rodes, no hi haurà problemes de tracció.

### Acceleració lateral màxima

Cas 1: Fallada per tracció. Com s'ha vist en la disposició anterior, si l'adherència dels pneumàtics amb el paviment no canvia, l'acceleració lateral que farà que perdin tracció és la mateixa per a qualsevol vehicle. L'acceleració lateral màxima no depèn del pes del vehicle.

En lliscament imminent,  $F_{f,màx} = \mu \cdot N$ , s'arriba a l'expressió (5.18) anterior:

$$N = m \cdot g \rightarrow F_{f,màx} = \mu \cdot m \cdot g = m \cdot a_{lateral} \rightarrow a_{lateral} = \mu \cdot g$$

$$\mu_{asfalt} = 1, \rightarrow a_{lateral} = g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

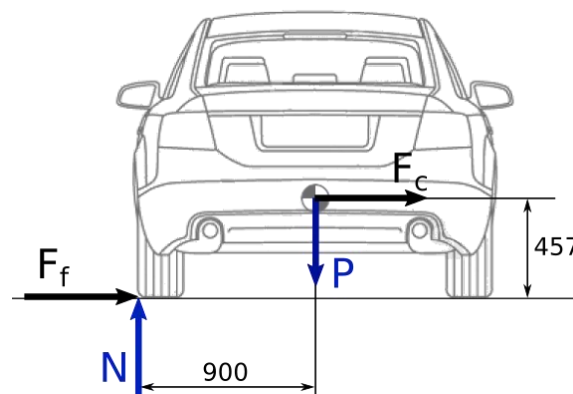
El valor numèric de  $F_{f,màx}$  sí que dependrà de la massa i en aquesta disposició és:

$$F_{f,màx} = 1 \cdot 2095,8 \cdot 9,81 = 20560 \text{ N}$$

Cas 2: Fallada per bolcament. Com en el cas anterior, l'acceleració lateral limitant no depèn a priori de la massa. Tanmateix, com que en afegir massa al vehicle s'ha desplaçat el centre de gravetat, sí que canviarà l'acceleració lateral màxima en aquesta disposició.

L'acceleració lateral màxima del cas 1 són  $9,81 \text{ m/s}^2$  (i.e.  $1g$ ).

El diagrama de forces és el següent:



**Figura 5.10:** diagrama de forces del turisme durant un canvi de direcció en un pla horitzontal en la disposició 2 del tren de potència.

Com abans (5.19) s'agafa la situació de bolcament imminent:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = m \cdot a \quad ; \quad F_f = m \cdot a_{centrípeta} = F_{centr} \\ \sum F_y = 0 \quad ; \quad N = P \rightarrow N = m \cdot g \\ \sum M_{(z)}(O) = 0 \quad ; \quad F_f \cdot 0,457 - P \cdot 0,900 = 0 \end{array} \right. \rightarrow \begin{array}{l} a_{centrípeta} = \frac{F_f}{m} \\ F_f = \frac{0,900 \cdot m \cdot g}{0,457} \end{array} \quad (5.25)$$

D'aquí s'extreu l'acceleració centrípeta:

$$a_{centrípeta} = \frac{\frac{0,900 \cdot m \cdot g}{0,457}}{m} = \frac{0,900}{0,457} \cdot g \cong 2g$$

L'acceleració per bolcar el cotxe segueix sent superior a l'acceleració de lliscament. Per tant, el cotxe arribarà a la situació de pèrdua d'adherència abans d'arribar a la situació de bolcada i no bolcarà.

En les proves d'acceleració lateral no influeix el canvi de massa, com s'ha comentat. Així, en la pista circular estàndard 100 metres de radi la velocitat màxima que podria assolir el vehicle és igual que en la disposició anterior:

$$a_{centrípeta} = 1g = \frac{v^2}{R} \rightarrow v \approx 113 \text{ km/h}$$

## Velocitat màxima

La velocitat màxima es pot obtenir igualant la derivada de la funció velocitat (i.e. l'acceleració) a 0. L'expressió que es necessita ja ha estat calculada (5.13):

$$a_2 = \frac{\frac{P}{v} - F_{RR} - f_D \cdot v^2}{m + m_{eq.}} \rightarrow \frac{\frac{P}{v} - F_{RR} - f_D \cdot v^2}{m + m_{eq.}} = 0 \quad \text{Substituint els valors:}$$

$$\frac{\frac{160.000}{v} - 410,21 - 0,3238 \cdot v^2}{2095,8 + 422,27} = 0 \rightarrow \begin{cases} v_1 = 73,73 \text{ m/s} \\ v_2 = \text{solució} \notin \mathbb{R} \\ v_3 = \text{solució} \notin \mathbb{R} \end{cases}$$

La velocitat obtinguda, 73,7 m/s (265 km/h) és la velocitat teòrica màxima amb les utilitzant tota la potència del motor. No obstant això, com s'ha comentat, els coixinets de les parts mòbils tenen una velocitat màxima de gir de 12.000 rpm.

$$12.000 \text{ rpm (al motor)} = 48,87 \text{ m/s (vehicle)} \cong 176 \text{ km/h}$$

Per tant, s'haurà de tornar a posar un limitador electrònic per evitar que s'excedeixi aquesta velocitat.

## Autonomia

Agafant les dades de consum, s'introdueix el nou pes del vehicle en l'expressió (A.2) per obtenir les necessitats energètiques. En la disposició amb tracció a les 4 rodes el turisme té una massa total d'ordre de marxa de 2095,8 kg. Les necessitats energètiques són:

$$e [km/kWh] = -0,001738 \cdot 2095,8 + 8,17 = 4,53 km/kW$$

$$\frac{1}{e} = 0,221 kW/km$$

El turisme en aquesta disposició té una bateria de 117 kW·h, del quals només en són aprofitables un 95% (111 kW·h). A més, fent les consideracions com en la disposició anterior, s'estableix que en unes 6h de conducció s'hauran consumit 4,8 kW·h. Amb les necessitats energètiques del vehicle i el rendiment es determina l'autonomia per aquesta disposició:

$$(111 - 4,8) kWh \cdot 0,77 \cdot \frac{4,53 km}{1 kWh} \approx 370 km$$

### 5.2.4. Resum de la disposició 2: tracció a 4 rodes

Característiques generals	
Tracció	4x4
Pes	2021 kg
Velocitat màxima	176 km/h (limitat)
Potència	100 kW (134 cv)
Potència màxima	160 kW (214 cv)
Acceleració 0 – 100 km/h	9,06 s
Autonomia	370 km
Característiques del tren de potència	
Motor	Trifàsic de CA
Potència	100 kW (134 cv)
Parell	350 N·m
Revolucions màx. motor	12.000 rpm
Bateria (ions de liti)	10.600 cel·les de 3,7V
Refrigeració	Líquid refrigerant
Capacitat de la bateria	117 kW·h
Potència nominal bateria (en descàrrega)	120 kW
Convertidor	Inversor bidireccional
Potència del convertidor	110 kW
Pes de la bateria	504 kg
Pes del tren de potència	724 kg

Taula 5.16: característiques de la disposició 2 del tren de potència.

- Bateria                      ■ Electrònica de potència
- Motor                        ■ Espai per altres sistemes del vehicle
- Transmissió

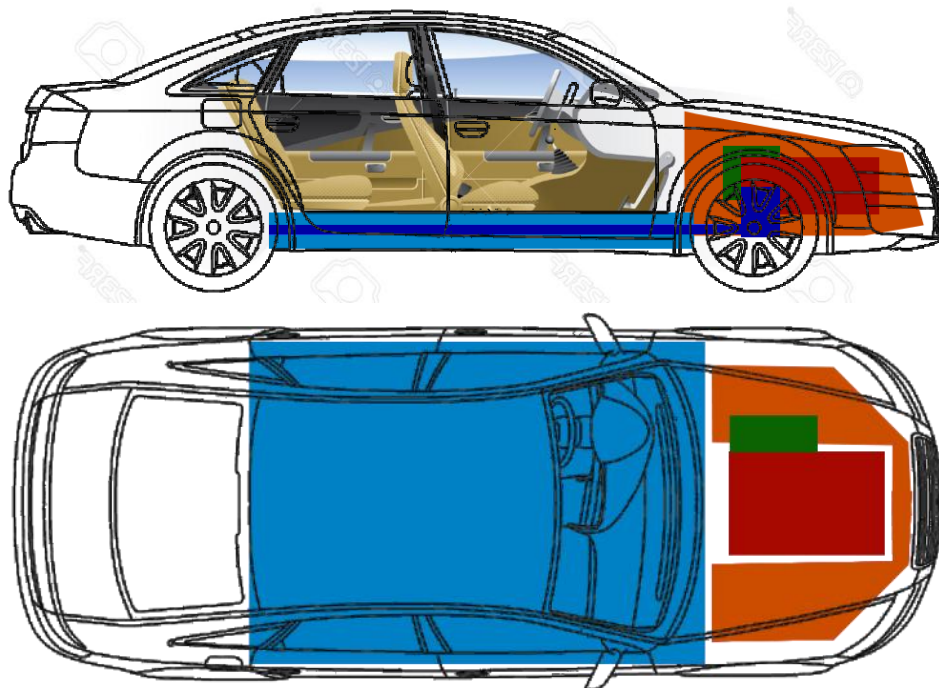


Figura 5.11: elements del tren de potència en la disposició 2 exclouent els eixos de les rodes.

## 5.3. Motor a roda

### 5.3.1. Descripció general

Per intentar augmentar l'eficiència del tren de potència se'n reduiran al màxim els elements. La bateria, l'inversor i el motor són indispensables per propulsar el vehicle amb el motor elèctric. Tanmateix, la transmissió es podria eliminar del tren de potència, aplicant directament el motor a les rodes. En aquesta disposició ja no cal transmetre el moviment a les rodes perquè el rotor del motor és fix al suport de llanda, és a dir, la roda i el motor giren solidàriament.

Per aprofitar els avantatges que ofereix la disposició es col·locarà un motor a cada roda, obtenint així un vehicle amb tracció a totes les rodes però sense perdre eficiència en les transmissions. En primera instància això podria provocar un augment de massa del vehicle, ja que cal posar més motors, però això no és necessàriament cert a causa dels següents factors:

- En posar el motor prop de l'exterior del vehicle no cal un sistema de refrigeració, sinó que es poden refrigerar per convecció amb l'aire exterior. Amb això s'estalvia el pes del sistema de refredament del motor.
- La transmissió es substitueix per motors, amb la qual cosa no s'augmenta necessàriament la massa en fer aquest canvi.

Els elements d'aquest tren de potència són els següents:

#### Bateria

Cel·les	Dimensions aproximades (m)	Massa (kg)	Capacitat
10600	1,3x0,1x1.8 (0,234 m <sup>3</sup> )	504	117 kW·h

Taula 5.17: dades de la bateria d'ions de liti en la disposició 3 del tren de potència.

#### Motor

Tipus	Dimensions aproximades(m)	Massa (kg)	Potència nominal	Potència màxima	Parell màxim
Síncron CA	Ø0,4x0,2	40	25 kW	40 kW	400 N·m

Taula 5.18: dades del motor síncron de corrent altern amb imants permanents utilitzat en la disposició 3 del tren de potència.

S'haurà de dissenyar o triar un motor amb un parell molt alt per poder assolir una acceleració raonable sense tenir una transmissió intermèdia que multipliqui el parell.



## Electrònica de potència

Tipus	Dimensions aproximades (m)	Massa (kg)	Potència nominal
Inversor de tracció bidireccional	0,4x0,4x0,2 (0,032 m <sup>3</sup> )	20	110 kW

Taula 5.19: dades de l'inversor de tracció bidireccional de la disposició 3 del tren de potència.

### 5.3.2. Balanç energètic

L'energia continguda a la bateria es transforma a energia cinètica durant la propulsió. En frenada regenerativa l'energia flueix en sentit contrari.

### Flux d'energia

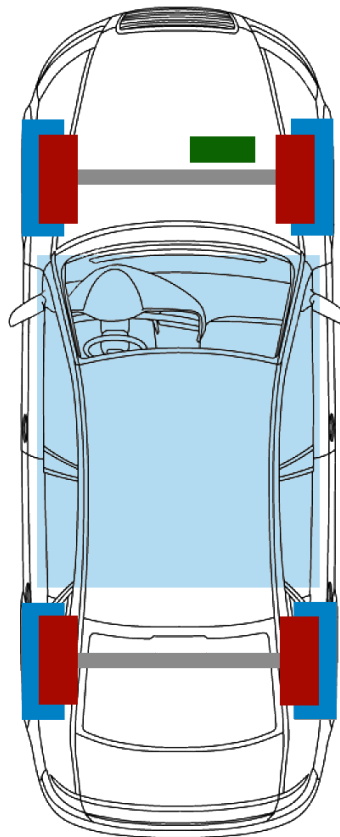
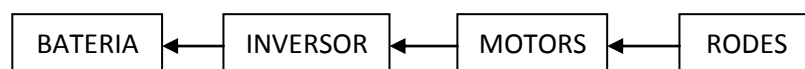


Figura 5.12: esquema general del tren de potència en la disposició amb tracció a 4 rodes i amb motors independents. En blau hi ha marcades les parts que són motrius.

Propulsió:



Frenada regenerativa:



	Bateria	Inversor	Motor	Rodes	$\eta$ total
Eficiència	0,99	0,95	0,94	0,94	0,83

Taula 5.20: eficiència (rendiment energètic) dels elements de la disposició 3 del tren de potència.

En absència de les pèrdues ocasionades per la transmissió augmenten l'eficiència del turisme en la disposició amb motor a roda aconseguint un 83%.

### Refrigeració

L'energia que s'ha de dissipar a la bateria, als 4 motors i a l'inversor en estat estacionari són les pèrdues per efecte Joule. En aquesta disposició cal dissipar-les per convecció amb aire ambient.

### 5.3.3. Dinàmica del vehicle

En aquesta disposició totes les rodes són motrius. En aquest cas no cal transmetre el moviment del motor a totes les rodes, sinó que el moviment ja s'aplica directament a la roda. Les disposicions amb tracció a totes les rodes són especialment recomanades per a vehicles que circularan en condicions d'adherència desfavorables. La relació de transmissió ( $\tau$ ) entre el motor i l'eix de les rodes és d'1:1, és a dir, una transmissió directa.

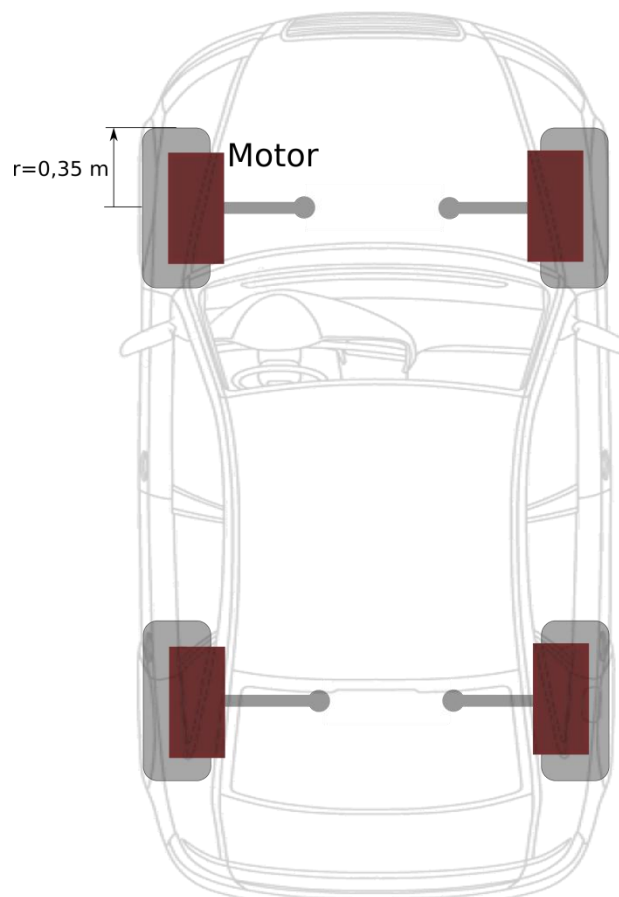


Figura 5.13: esquema de la part propulsora del tren de potència

### Posició del centre de massa

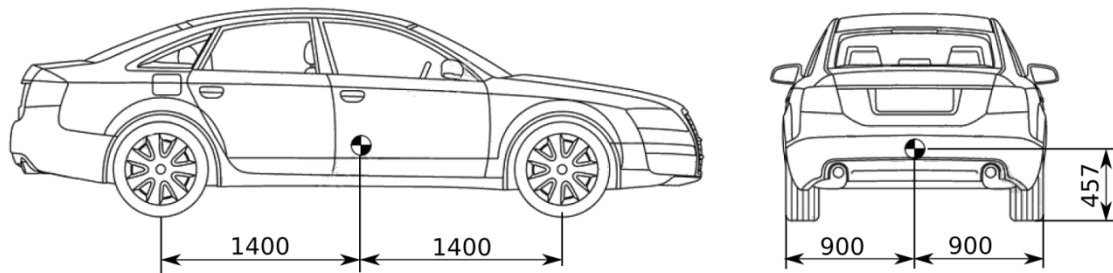
La disposició amb tracció a totes les rodes i amb el motor situat a la roda tindrà un centre de massa molt baix, com les altres disposicions. El fet que tota la massa del tren de potència estigui en una posició molt baixa contribueix a abaixar la posició z del centre de gravetat.

El centre de massa resultant és:

Component	Massa (kg)	Posició z de G (m)
Cotxe sense tren de potència	1296,8	0,53
Bateria	504	0,30
Motors 40 kg (x4)	160	0,35
Inversor	20	0,50
TOTAL	1980,8	0,457

**Taula 5.21: centre de gravetat en la disposició 2 del tren de potència.**

La posició del centre de massa en aquesta disposició del tren de potència és igual que en la disposició anterior: (dades en mm)



**Figura 5.14: posició del centre de gravetat del vehicle en la disposició 3 del tren de potència.**

### Resistència inercial rotativa

En la tracció a les 4 rodes hi ha molts més elements amb inèrcies de rotació. A més, quan se situen els motors a les rodes cal afegir la inèrcia dels rotors dels motors a la inèrcia rotativa total del vehicle. En aquest cas només es tindrà la inèrcia de les rodes i dels rotors dels motors.

La inèrcia dels motors és:

$$I_{4 \text{ motors}} = 4 \cdot I_{\text{motor}} = 4 \cdot 0,3 = 1,2 \quad (5.26)$$

Per tant, la massa equivalent total del vehicle és:

$$m_{eq.} = (I_{roda} + I_{4 \text{ motors}}) \cdot \left( \frac{1}{r_{roda}} \right)^2 \quad (5.27)$$

La resistència inercial rotativa per la configuració del tren de potència és:

$$F_{RI} \equiv RI = 1,2 \cdot \left(\frac{1}{0,35}\right)^2 \cdot a = 9,8 \cdot a \quad [N]$$

### Resistència de rodolament

Com s'ha augmentat lleugerament el pes del turisme, també augmentarà la força normal en el mateix valor. Alhora, com la resistència al rodolament depèn de la força normal, també augmentarà.

Agafant l'aproximació de la resistència al rodolament, es té:

$$RR = C_{rr} \cdot N \quad ; \quad \text{on:}$$

$$F_{RR} \equiv RR = 0,02 \cdot N = 0,02 \cdot mg = 0,02 \cdot 2055,8 \cdot 9,81 = 403,35 \text{ N}$$

### Acceleració lineal de 0 a 100 km/h

En un turisme amb tracció a les 4 rodes els factors limitants de l'acceleració són l'adherència dels pneumàtics a la carretera i la potència del motor. A efectes pràctics, però, l'únic factor limitant serà la potència del motor. Tenint en compte el repartiment de parell dels diferencials, si les rodes davanteres perden tracció per efecte de l'acceleració les rodes posteriors en tindran amb gairebé tota seguretat.

Com que el cotxe té el mateix motor i la mateixa relació de transmissió, el parell d'arrencada màxim del motor sobre l'eix de les rodes és igual que en la disposició anterior:

(La relació de transmissió és  $r=9$ )

$$\Gamma_{motor \rightarrow rodes} = 4 \cdot \Gamma_{motor} = 4 \cdot 400 = 1600 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La força que exerceix la roda sobre el terra i recíprocament la força amb què es propulsa el vehicle és:

$$F_{propulsi \text{ ó }} = \frac{\Gamma_{motor \rightarrow rodes}}{r} = \frac{1600}{0,35} = 4571 \text{ N}$$

Aplicant la segona Llei de Newton calculem l'acceleració màxima del vehicle en ordre de marxa. Així doncs cal afegir el pes del conductor, 75 kg.

La resultant de forces, és:

$$F_{a0} = F_{prop.} - F_{RR} - F_{RI} - F_D \quad \rightarrow \quad F_{a0} = m \cdot a$$

(Amb  $v=0$ ,  $F_D=0$  si no hi ha vent, és a dir, la velocitat del flux d'aire que incideix sobre el cotxe és 0 si aquest està aturat.)

$$4571 - 403,35 - 9,8 \cdot a = 2055,8 \cdot a \rightarrow a_{0 \text{ km/h}} = 2,02 \text{ m/s}^2$$

Amb les limitacions de parell i velocitat angular que té el motor, es calcularà l'acceleració en els 2 trams: limitació de parell (1) i de potència (2), com en la disposició anterior. La resistència aerodinàmica no varia i com s'ha calculat anteriorment,  $F_D = 0,3238 \cdot v^2$ .

Quina és la velocitat a la qual el parell es redueix? ( $P_{m\grave{a}x} = 160 \text{ kW}$ )

$$P_{m\grave{a}x} = F_{prop.} \cdot v \rightarrow v = \frac{P_{m\grave{a}x}}{F_{prop.}} = \frac{160.000}{4571} = 35,00 \text{ m/s (126 km/h)}$$

La velocitat a què es redueix el paerell és fora de l'interval de velocitats considerat. Per tant, només hi haurà un sol tram (limitació de parell).

$$(0) \quad \Gamma_{motor} = 400 \text{ N} \cdot \text{m} ; F_0 = 4571 \text{ N} ; a_0 = 2,02 \text{ m/s}^2 , \text{ ja calculat.}$$

$$(1) \quad P_{motor} = 25 \text{ kW} , \quad \Gamma_{motor} = 400 \text{ N} \cdot \text{m} ; \text{ Fins a quina velocitat podrà donar parell màxim?}$$

Tram (1): de  $0 \text{ m/s}$  a  $27,7 \text{ m/s} = 100 \text{ km/h}$

Seguint el mateix procediment, com en la disposició 1, l'expressió de la força en aquest tram és:

$$F_{a1} = 4147,9 - 0,3238 \cdot v^2 \rightarrow \begin{cases} v_0 = 0; F_{a0} = 4147,9 \text{ N} \\ v_1 = 27,7 \text{ m/s}; F_{a1} = 3898 \text{ N} \end{cases} \quad (5.28)$$

L'acceleració al tram 1, l'únic tram, és:

$$\bar{a}_1 = \frac{1}{(27,7 - 0) \cdot 2055,8} \cdot \int_0^{27,7} (4147,9 - 0,3238 \cdot v^2) dv = 1,98 \text{ m/s}^2$$

Amb l'acceleració determinada, es pot determinar el temps que tardarà el vehicle assolir  $100 \text{ km/h}$  des del repòs:

Tram	Velocitat [m/s] (km/h)	Acceleració mitjana ( $\text{m/s}^2$ )	Temps (s)	Distància recorreguda (m)
1	0 – 27,8 (100)	1,98	14,03	194,8

**Taula 5.22: càlculs de distància, temps i acceleració mitjana del vehicle amb el tren de potència en la disposició 3.**

El temps que tarda el turisme en accelerar de  $0$  a  $100 \text{ km/h}$  són  $14,03 \text{ s}$  sobrecarregant els motors a  $40 \text{ kW}$  ( $160 \text{ kW}$  totals) durant un interval curt de temps.

## Inclinació màxima en acceleració

Com en la disposició anterior, la tracció és a les 4 rodes, no hi haurà problemes de tracció. A més, l'acceleració assolible és notablement més baixa que en les disposicions prèvies.

## Acceleració lateral màxima

Cas 1: Fallada per tracció. Com s'ha vist anteriorment, l'acceleració lateral màxima no depèn del pes del vehicle i és igual als casos anteriors si es mantenen les condicions d'adherència.

$$\mu_{\text{asfalt}} = 1, \rightarrow a_{\text{lateral}} = g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

El valor numèric de  $F_{f,m\grave{a}x}$  sí que dependrà de la massa i en aquesta disposició és:

$$F_{f,m\grave{a}x} = 1 \cdot 2055,8 \cdot 9,81 = 20167 \text{ N}$$

Cas 2: Fallada per bolcament. Com en el cas anterior, en desplaçar el centre de gravetat al canviar la massa, també canviarà l'acceleració lateral màxima en aquesta disposició. Tanmateix, el centre de massa es troba a la mateixa posició z que en la disposició anterior. Per tant, els càlculs seran idèntics.

L'acceleració centrípeta màxima abans del bolcament és:

$$a_{\text{centr ípeta}} = \frac{\frac{0,900 \cdot m \cdot g}{0,457}}{m} = \frac{0,900}{0,457} \cdot g \cong 2g$$

L'acceleració per bolcar el cotxe segueix sent superior a l'acceleració de lliscament. El cotxe arribarà a la situació de pèrdua d'adherència abans d'arribar a la situació de bolcada i no bolcarà.

En les proves d'acceleració lateral no influeix el canvi de massa ni el canvi de posició del centre de gravetat. Per tant, en la pista circular estàndard 100 metres de radi la velocitat màxima que podria assolir el vehicle és igual que en les disposicions anteriors:

$$v \approx 113 \text{ km/h}$$

## Velocitat màxima

La velocitat màxima es pot obtenir igualant la derivada de la funció velocitat (i.e. l'acceleració) a 0. L'expressió que es necessita ja ha estat calculada en els

apartats anteriors (5.13). Com que s'està intentant buscar la velocitat màxima es calcula amb l'acceleració al tram 2 (limitació de potència), tot i que en el càlcul de l'acceleració de 0 a 100 km/h el tram quedés fora de l'interval estudiat.

$$a_2 = \frac{\frac{P}{v} - F_{RR} - f_D \cdot v^2}{m + m_{eq.}} \rightarrow \frac{\frac{P}{v} - F_{RR} - f_D \cdot v^2}{m + m_{eq.}} = 0 \quad \text{Substituïnt els valors:}$$

$$\frac{\frac{160.000}{v} - 403,35 - 0,3238 \cdot v^2}{2055,8 + 9,8} = 0 \rightarrow \begin{cases} v_1 = 73,81 \text{ m/s} \\ v_2 = \text{solució} \notin \mathbb{R} \\ v_3 = \text{solució} \notin \mathbb{R} \end{cases}$$

La velocitat obtinguda, 73,8 m/s (266 km/h) és la velocitat teòrica màxima amb les utilitzant tota la potència del motor. En aquesta disposició no hi haurà la limitació de velocitat dels coixinets, ja que 266 km/h és una velocitat assolible per als elements mecànics i les rodes. En no haver-hi transmissió, la velocitat de gir dels eixos no es multiplica per la relació de transmissió. No obstant això, els elements que conformen les parts mòbils s'han de dissenyar per suportar aquestes velocitats. Per citar alguns exemples: els pneumàtics que s'han d'instal·lar en les llandes han de ser d'alta velocitat; els motors a roda han de poder girar a 2014 rpm.

$$73,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{0,35 \text{ m (radi)}} \cdot \frac{1 \text{ rev.}}{2\pi \text{ rad}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 2014 \text{ rpm}$$

## Autonomia

Anàlogament a les disposicions anteriors, s'agafen les dades de consum i s'introdueix el pes del vehicle en l'expressió (A.2) per obtenir les necessitats energètiques. En la disposició amb tracció a les 4 rodes el turisme té una massa total d'ordre de marxa de 2055,8 kg. Les necessitats energètiques són:

$$e \text{ [km/kWh]} = -0,001738 \cdot 2055,8 + 8,17 = 4,60 \text{ km/kWh}$$

$$\frac{1}{e} = 0,218 \text{ kWh/km}$$

El turisme en aquesta disposició té una bateria de 117 kW·h, dels quals només en són aprofitables un 95% (111 kW·h). A més, fent les consideracions com en la disposició anterior, s'estableix que en unes 6h de conducció s'hauran consumit 4,8 kW·h. Amb les necessitats energètiques del vehicle i el rendiment d'aquesta disposició es determina l'autonomia:

$$(111 - 4,8) \text{ kWh} \cdot 0,83 \cdot \frac{4,60 \text{ km}}{1 \text{ kWh}} \approx 405 \text{ km}$$

### 5.3.4. Resum de la disposició 3: motor a roda

Característiques generals	
Tracció	4x4 totalment independent
Pes	1981 kg
Velocitat màxima	266 km/h
Potència	100 kW (134 cv)
Potència màxima	160 kW (214 cv)
Acceleració 0 – 100 km/h	14,03 s
Autonomia	405 km
Característiques del tren de potència	
Motor	4 motors trifàsics de 25 kW
Potència	100 kW (134 cv)
Parell	400 N·m
Revolucions màx. motor	2014 rpm
Bateria (ions de liti)	10.600 cel·les de 3,7V
Refrigeració	Aire
Capacitat de la bateria	117 kW·h
Potència nominal bateria (en descàrrega)	120 kW
Convertidor	Inversor bidireccional
Potència del convertidor	110 kW
Pes de la bateria	504 kg
Pes del tren de potència	684 kg

Taula 5.23: característiques de la disposició 3 del tren de potència.

- Bateria
- Electrònica de potència
- Motor
- Espai per altres sistemes del vehicle

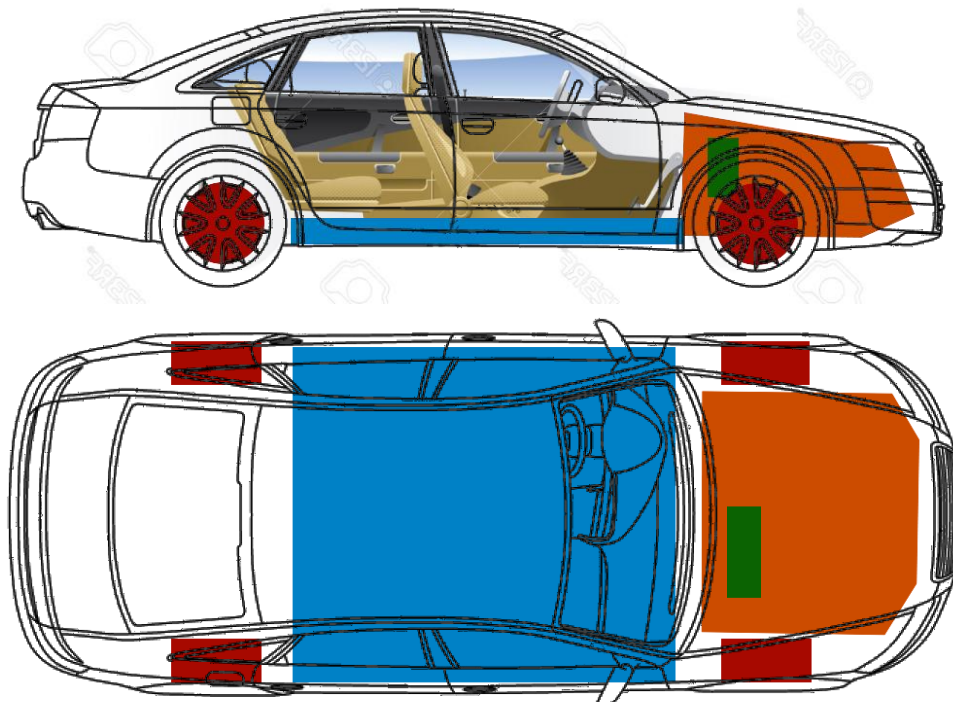


Figura 5.15: elements del tren de potència en la disposició 3 excloent els eixos.



## 6. Comparativa dels trens de potència

Els resultats de les anàlisis dels tres tipus de trens de potència s'han de posar en perspectiva per poder comprendre la magnitud de les especificacions que cada disposició ofereix. En termes absoluts és difícil fer un judici sobre el valor que té una característica determinada. Per aquest motiu es compararan diferents aspectes dels trens de potència elèctrics estudiats entre ells i amb un tren de potència convencional. Per tant, en les comparatives hi haurà els següents trens de potència:

- Motor i eix motriu adjacents
- Tracció a les 4 rodes amb motor davanter
- Tracció a les 4 rodes amb motors a roda
- Motor de combustió interna

### 6.1. Especificacions tècniques

Es consideraran 5 aspectes: acceleració, consum, pes, autonomia i velocitat màxima. Per fer la comparativa es triarà un turisme amb un pes i una potència similars al turisme model dels trens de potència elèctrics.

El turisme amb motor de combustió interna considerat (Mercedes-Benz Classe E 250 BlueTEC amb canvi 7G-Tronic i transmissió 4Matic) té les següents característiques: [15]

Característiques generals	
Tracció	4x4 (4Matic, parell 45:55)
Pes	1800 kg
Velocitat màxima	238 km/h
Potència	204 cv
Acceleració 0 – 100 km/h	8,2 s
Autonomia	708 km
Característiques del tren de potència	
Motor	Dièsel, 4 cilindres en línia
Cilindrada/desplaçament	2143 cc
Alimentació	Injecció <i>commonrail</i> , 2 turbocompressors
Potència	150 kW a 3800 rpm
Parell	500 N·m a 1600 rpm
Consum mitjà combinat	8,3 L/100 km
Revolucions màx. motor	4200 rpm
Refrigeració	Líquid refrigerant
Capacitat de combustible	59 L
Pes del combustible	50 kg
Pes del tren de potència	450 kg

Taula 6.1: característiques del tren de potència amb motor de combustió interna (CI).

### 6.1.1. Acceleració

El temps per accelerar de 0 a 100 km/h dels diferents trens de potència són els indicats a la Taula 6.2.

Disposició 1	Disposició 2	Disposició 3	Motor de CI
Motor adjacent	Motor únic i 4x4	Motor a roda 4x4	Motor únic i 4x4
8,42 s	9,06 s	14,03 s	8,2 s

**Taula 6.2: comparativa dels temps d'acceleració des del repòs fins a 100 km/h.**

La potència màxima dels trens de potència elèctrics és igual: 160 kW. El turisme amb motor de combustió interna té una potència màxima de 150 kW. Tot i que la potència és lleugerament menor, el turisme amb el motor de combustió interna aconsegueix assolir 100 km/h en el menor temps.

El motor més lent en assolir 100 km/h és el de la disposició 3, amb motors a roda independents. Degut a la limitació de parell i a l'absència de transmissió, la força que fa accelerar el vehicle és inferior a les demés disposicions. Tanmateix, 14 segons per accelerar no és un resultat que faci el cotxe inviable o perillós per a la circulació.

Comparant els resultats de les obtinguts per les diferents disposicions entre sí, el motor de combustió interna només és un 3% més ràpid que la disposició 1. Com no s'està estudiant el seu rendiment com a vehicle de competició, es considerarà negligible la diferència.

### 6.1.2. Consum

Per poder comparar el consum energètic dels diferents trens de potència cal posar totes les dades en les mateixes unitats. Com que els trens de potència estudiats són elèctrics, es farà la comparativa en kW·h/km.

El consum del vehicle de combustió interna és:

$$8,3 \frac{L (dièsel)}{100 km} \cdot \frac{36 MJ}{1 L} \cdot \frac{1 kWh}{3,6 MJ} = 0,83 kWh/km$$

Per tant, la comparativa de trens de potència és:

Disposició 1	Disposició 2	Disposició 3	Motor de CI
Motor adjacent	Motor únic i 4x4	Motor a roda 4x4	Motor únic i 4x4
0,213 kWh/km	0,221 kWh/km	0,218 kWh/km	0,83 kWh/km

**Taula 6.3: consum energètic per quilòmetre dels diferents trens de potència estudiats.**

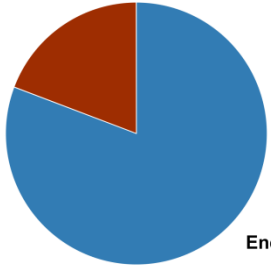
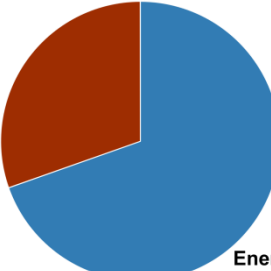
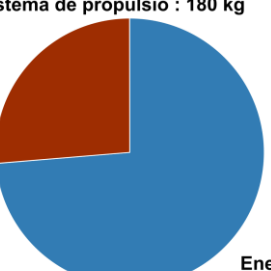
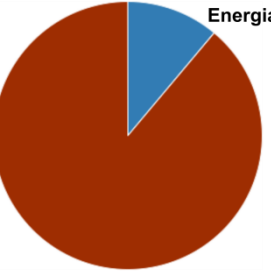
S'observa que el motor de combustió interna té les necessitats energètiques més grans. Un dels factors principals que influeix en aquest resultat és el baix

rendiment del tren de potència. Això es tradueix en una major despesa energètica per aconseguir moure el vehicle.

En comparació amb el tren de potència elèctric que té un consum més gran, el de la disposició 2, el motor de combustió interna necessita un 276% més d'energia per funcionar.

### 6.1.3. Pes

Els trens de potència estudiats tenen les següents masses:

<b>Disposició 1</b>	Motor adjacent	624 kg	<p><b>Sistema de propulsió : 120 kg</b></p>  <p>Energia : 504 kg</p> <p>■ Energia ■ Sistema de propulsió</p>
<b>Disposició 2</b>	Motor únic i 4x4	724 kg	<p><b>Sistema de propulsió : 220 kg</b></p>  <p>Energia : 504 kg</p> <p>■ Energia ■ Sistema de propulsió</p>
<b>Disposició 3</b>	Motor a roda 4x4	684 kg	<p><b>Sistema de propulsió : 180 kg</b></p>  <p>Energia : 504 kg</p> <p>■ Energia ■ Sistema de propulsió</p>
<b>Motor de CI</b>	Motor únic i 4x4	450 kg	<p><b>Energia : 50 kg</b></p>  <p>Sistema de propulsió : 400kg</p> <p>■ Energia ■ Sistema de propulsió</p>

**Taula 6.4: comparativa de les masses dels diferents trens de potència.**

En la comparativa s'observa que els trens de potència elèctrics tenen un ràtio un pes clarament superior al tren amb motor de combustió interna. Tanmateix, la major part del pes dels trens amb propulsió elèctrica es deu al sistema d'emmagatzemament d'energia, és a dir, a la bateria. Aquesta, que pesa 504 kg en els casos estudiats, suposa el 25% del pes del vehicle.

El tren de potència elèctric més pesant és el de la disposició 2, amb 724 kg. Si no es tingués en compte la massa de la bateria, el tren de potència només pesaria 220 kg, aproximadament la meitat del que pesa el tren de potència del vehicle amb motor de combustió interna.

Així, s'observa un clar desavantatge dels vehicles elèctrics en haver d'emmagatzemar l'energia en un dispositiu tan pesant com ho són les bateries de liti.

#### 6.1.4. Autonomia

L'autonomia dels vehicles estudiats l'indicada a la taula 6.5:

Disposició 1	Disposició 2	Disposició 3	Motor de CI
Motor adjacent	Motor únic i 4x4	Motor a roda 4x4	Motor únic i 4x4
400 km	370 km	405 km	708 km

**Taula 6.5: autonomia dels trens de potència analitzats. No es considera la frenada regenerativa.**

L'autonomia del vehicle amb tren de potència amb motor de combustió interna és clarament superior: té un 75% més d'autonomia que el tren de potència elèctric que més en té, el de la disposició 3.

D'altra banda, l'energia emmagatzemada a la bateria estudiada són 111 kWh. El dipòsit del vehicle amb el tren de potència convencional té una capacitat de 59 L que en combustible dièsel és equivalent a 590 kWh. Per tant, tenim aproximadament 5 vegades més energia emmagatzemada en el vehicle i només s'obté un 75% més d'autonomia. Si la bateria del vehicle elèctric pogués contenir la mateixa energia que té el gasoil del dipòsit s'aconseguiria una autonomia de 2000 km.

### 6.1.5. Velocitat màxima

Les velocitats màximes teòriques dels vehicles són:

Disposició 1	Disposició 2	Disposició 3	Motor de CI
Motor adjacent	Motor únic i 4x4	Motor a roda 4x4	Motor únic i 4x4
176 km/h (limitat)	176 km/h (limitat)	266 km/h	238 km/h

Taula 6.6: velocitat màxima dels trens de potència analitzats.

Com s'ha comentat, els tres trens de potència elèctrics tenen la mateixa potència màxima, 160 kW. Donades les condicions de potència, tenint en compte que les resistències passives són semblants i la resistència aerodinàmica és igual per a les 3 disposicions, la velocitat màxima teòrica és aproximadament la mateixa: 269/265/266 km/h, respectivament. Les disposicions 1 i 2 tenen la limitació de 12.000 rpm del motor la qual cosa limita la velocitat del vehicle a 176 km/h. Aquest inconvenient es podria resoldre incrementant la resistència de les parts mòbils del tren de potència, sobretot en el motor i els components de la transmissió que giren més ràpidament. Tanmateix, això augmentaria la complexitat i els costos del tren de potència.

El tren de potència amb motor de combustió interna assoleix unes velocitats més baixes per diferents factors: potència lleugerament inferior (10 kW menys), un coeficient de resistència aerodinàmica major (0,27) i la naturalesa del motor de combustió interna.

El tren de potència convencional, en tenir un pes una mica inferior, podria contrarestar el desavantatge de tenir una potència lleugerament inferior i un coeficient  $C_D$  una més gran. No obstant això, la naturalesa del motor de combustió interna pot ser la causa principal de la limitació de la velocitat màxima:

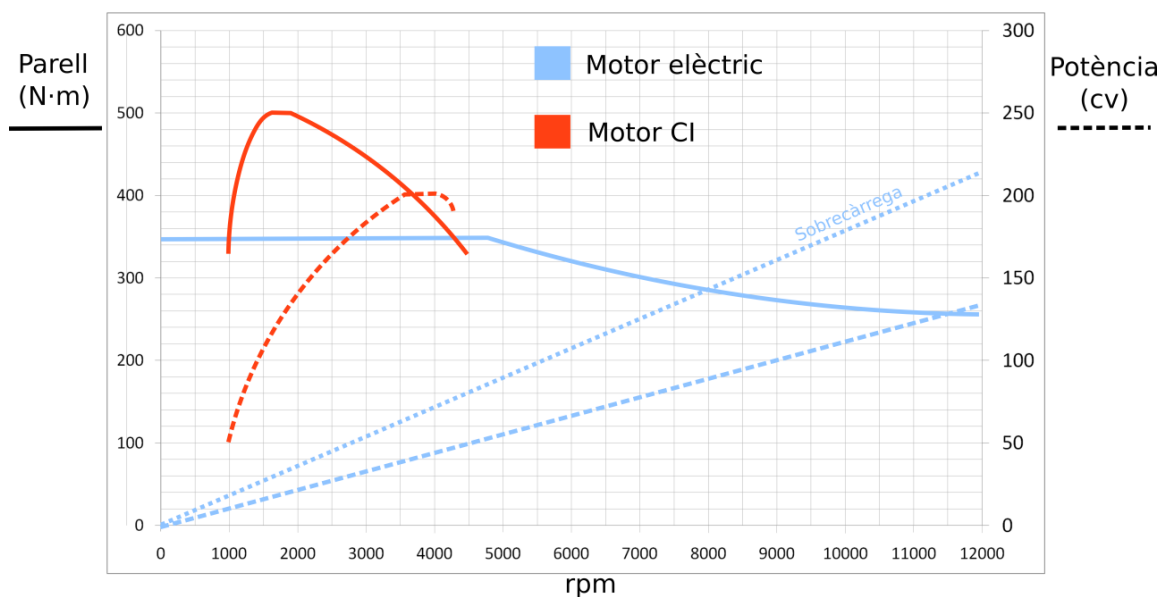


Figura 6.1: comparativa de les corbes parell-revolucions i potència-revolucions per al motor elèctric i per al motor de combustió interna (dièsel) estudiats.

Com podem veure a la figura 6.1, el parell disminueix en augmentar la velocitat de gir del motor, la qual cosa redueix la força de propulsió del vehicle. A més, la potència no té una variació constant en tot el rang de velocitats de funcionament del vehicle, a diferència del comportament dels motors elèctrics.

## 6.2. Dinàmica del vehicle

---

L'estudi de la dinàmica d'un vehicle comprèn la identificació de les forces i acceleracions que produeixen, però també la determinació de la cinemàtica del vehicle. Tots aquests elements en conjunció conformen la maniobrabilitat i el control d'un vehicle.

La següent taula il·lustra qualitativament la dinàmica en les disposicions estudiades del tren de potència:

	<b>Disposició 1</b>	<b>Disposició 2</b>	<b>Disposició 3</b>	<b>Motor de CI</b>
	Motor adjacent	Motor únic i 4x4	Motor a roda 4x4	Motor únic i 4x4
Acceleració mitjana	3,3 m/s <sup>2</sup>	3,1 m/s <sup>2</sup>	1,98 m/s <sup>2</sup>	3,39 m/s <sup>2</sup>
Ràtio potència/pes	83,3 W/kg	79,2 W/kg	80,8 W/kg	83,3 W/kg
Altura del centre de gravetat	0,463 m	0,457 m	0,457 m	0,6 m
Massa no suspesa	140 kg	160 kg	300 kg	160 kg

**Taula 6.7: comparativa de dades de la dinàmica dels trens de potència estudiats.**

Com s'ha comentat, les acceleracions de les disposicions 1, 2 i el motor de combustió interna són semblants, com també ho són les ràtios de potència/pes dels vehicles. D'aquí es pot extreure que els tres turismes es comportaran d'una manera semblant en termes de propulsió. El tren de la disposició 3 tindrà una reacció més lenta degut a la limitació de parell i a l'absència de transmissió.

L'altura del centre de gravetat influeix en la maniobrabilitat davant les corbes, disminuint el balanceig del vehicle. Com més lleu és el capcineig més adherència tenen les rodes, més estable és el vehicle i més confort hi haurà a l'habitacle. Per tant, les disposicions amb tren de potència elèctric són notablement més òptimes per a suportar canvis bruscs de direcció i/o velocitat.

La massa no suspesa és un factor que també influirà en el control i maniobrabilitat del turisme. Davant una irregularitat en la superfície de rodolament la suspensió és l'encarregada d'eliminar el desplaçament i acceleració produïdes. La suspensió no "aïlla" de les irregularitats la massa i tots els elements solidaris a aquesta que estan en contacte amb la superfície

per què circula el vehicle. Així, els pneumàtics, les llandes, els frens, suports de llanda... no pertanyen a la part suspesa. Els pneumàtics ofereixen un lleuger efecte de molla per a la massa no suspesa.

Els vehicles de les disposicions 1, 2 i el motor de CI tenen una massa no suspesa convencional, al voltant de 40 kg per roda. La maniobrabilitat en una superfície amb irregularitats no es veu afectada. En canvi, en la disposició 3 la massa no suspesa és molt gran i podria ocasionar problemes de control davant una superfície de rodament irregular quan se circula a alta velocitat.

## **6.3. Viabilitat**

---

### **6.3.1. Viabilitat tècnica**

En la comparativa d'especificacions s'han observat avantatges i inconvenients en totes les disposicions. En cap moment s'ha trobat un desavantatge prou gran com perquè faci inviable la seva aplicació com a tren de potència en un turisme. Per tant, es pot concloure que totes les disposicions estudiades són factibles des del punt de vista tècnic.

### **Manteniment**

El manteniment que requereixen els vehicles amb els trens de potència elèctrics estudiats és pràcticament nul. La bateria pot durar més de 10 anys amb una càrrega superior al 80% de la capacitat original. Els motors elèctrics en general no necessiten manteniment. Només caldria comprobar els nivells de refrigerant en els trens de potència que n'utilitzessin.

En vehicles amb motor de combustió interna el manteniment és notablement més freqüent: degut a les altes temperatures a què opera i a les nombroses parts mòbils necessita lubricació. En aquest tipus de vehicles cal fer periòdicament certes tasques de manteniment: canviar l'oli lubricant, comprobar el nivell de refrigerant, canviar les corretges de distribució, netejar filtre d'admissió d'aire, canviar el filtre de partícules de l'escapament, entre d'altres.

### **6.3.2. Viabilitat econòmica**

El major desavantatge dels trens de potència elèctrics es troba en la bateria. Els altres elements del tren de potència no causen reptes econòmics importants.

En primer lloc, amb la tecnologia actual, una bateria és incapaç d'emmagatzemar de manera compacta i lleugera grans quantitats d'energia.

Això causa un augment de pes del vehicle, una disminució de l'eficiència i se'n redueix l'autonomia.

A més, el preu de les bateries de liti és aproximadament de 2€/cel·la, o equivalentment, 185 €/kWh. La bateria dels trens estudiats costaria 21.000€, més del que val un cotxe convencional equivalent. Tot i que els costos es van reduïnt degut als avenços tecnològics i a la massificació de la fabricació de bateries, els costos de les bateries encara són força elevats.

Els vehicles elèctrics, però, tenen un avantatge molt distintiu: el cost de l'energia. L'energia elèctrica és molt barata en comparació amb l'energia que es pot extreure amb un motor de combustió interna a partir dels combustibles fòssils derivats del petroli. Així mateix, el rendiment del tren de potència elèctric és molt superior, augmentant la diferència de cost encara més.

	Tren de potència elèctric	Tren de potència amb motor de CI
Capacitat d'energia	111 kWh	590 kWh (59 L gasoil)
Preu de l'energia	0,13 €/kWh	0,105 €/kWh
Autonomia	400 km	708 km
Cost/km	0,036 €/km	0,088 €/km

**Taula 6.8: comparació dels consums energètics i cost econòmic associat a un tren de potència elèctric i un tren amb motor de CI.**

El preu per km en un vehicle amb un motor de combustió interna és 144% més gran que en un vehicle elèctric equivalent. En un vehicle elèctric que circuli 15.000 km a l'any tindrà un estalvi de 780€ anuals.

A tots aquests avantatges també caldria afegir-hi les facilitats fiscals que ofereixen els governs per promoure sistemes de transport que redueixin les emissions. En algunes ciutats l'aparcament, la recàrrega i les taxes de peatges dels vehicles elèctrics són gratuïts.

### 6.3.3. Viabilitat mediambiental

En la fabricació de la majoria dels components d'un tren de potència elèctric no es generen residus o emissions massa diferents dels que es generarien en la fabricació d'un vehicle amb motor de CI.

La bateria és un component que podria provocar residus importants, però els procediments utilitzats en la fabricació i el posterior reciclatge de la bateria en disminueixen l'impacte ambiental.



## Emissions

Davant les proves fefaents de l'escalfament global s'han de reduir les emissions per disminuir l'impacte ambiental i les greus conseqüències que se'n deriven. En termes d'emissions de gasos contaminants, els vehicles elèctrics són més nets que un vehicle de combustió interna. Això, però, no és sempre cert com es veu a la taula 6.9.

	<b>Tren de potència elèctric</b>	<b>Tren de potència amb motor de CI</b>
<b>Emissions de gasos d'efecte hivernacle per kWh</b>	~0 g/kWh (Hidroelèctrica) ~0 g/kWh (Eòlica) 29 g/kWh (Nuclear) 58 g/kWh (Biomassa) 499 g/kWh (Gas natural) 888 g/kWh (Carbó)	162 g CO <sub>2</sub> /kWh
<b>Emissions per quilòmetre</b>	~0 g/km (Hidroelèctrica) ~0 g/km (Eòlica) 8 g/km (Nuclear) 16 g/km (Biomassa) 138 g/km (Gas natural) 246 g/km (Carbó)	135 g CO <sub>2</sub> /km

**Taula 6.9: emissions de gasos d'efecte hivernacle de diferents fonts d'energia. [16]**

Segons la font d'energia a partir de la qual es genera l'electricitat, el vehicle elèctric és més net que el turisme amb motor de CI. Sempre i quan l'energia elèctrica provingui de les fonts renovables o amb poques emissions (hidroelèctrica, eòlica, biomassa, geotèrmica, mareomotriu, nuclear...) el vehicle elèctric serà menys contaminant.

A més, les emissions de gasos d'efecte hivernacle no són les úniques emissions perjudicials. Com la combustió no és perfecta i el combustible conté additius per oferir unes característiques determinades (per exemple, per retardar la combustió o impedir que es congeli a temperatures baixes) en els gasos d'escapament també hi ha gasos tòxics. En nuclis urbans amb molta densitat de vehicles la concentració de partícules perjudicials i gasos tòxics pot suposar un problema. En substituir els vehicles amb motors de CI per vehicles elèctrics s'obtingria un aire més net i saludable en les zones habitades, fins i tot en la situació més desfavorable (utilitzant fonts d'energia no renovables).

Anàlogament al cas anterior, si un vehicle elèctric recorre 15.000 km a l'any, deixarà d'emetre més de 2 tones de CO<sub>2</sub> que emetria el vehicle amb motor de combustió interna equivalent.

## 7. Conclusions

---

Amb l'anàlisi de cada tren de potència s'ha pogut veure les especificacions tècniques que ofereix en termes de característiques de propulsió, rendiment i dificultats tècniques. Els trens de potència elèctrics ofereixen molt bona eficiència energètica i una autonomia acceptable. En cap dels casos estudiats s'han trobat dificultats insalvables que en facin impossible la implementació en turismes. Per tant, els tres trens de potència són prou bons candidats per substituir els trens convencionals amb motor de combustió interna.

La disposició amb motor i eix motriu adjacents és un bon candidat per substituir els vehicles de combustió interna. El tren amb motor adjacent podria prendre el relleu a la disposició més utilitzada actualment en motors de CI, que es compon d'un motor davanter amb tracció davantera. Com a generalització, a aquesta disposició se la podria anomenar l'equivalent elèctric del tren de potència dels turismes convencionals.

Com que la bateria és l'element del tren de potència elèctric que té la major part de la massa, el motor també es podria situar a la part posterior i el vehicle tindria tracció posterior. En contraposició als vehicles amb motors de CI, això no modificaria substancialment la distribució del pes en els eixos, mantenint-se la relació 50:50.

Aquesta disposició tindria l'avantatge de ser relativament lleugera, amb poques transmissions i oferiria una autonomia de 400 km.

Anàlogament als trens de potència convencionals, si calgués un cotxe amb un tren de potència d'alt rendiment<sup>3</sup> es pot incorporar un diferencial central i transmetre el moviment a l'altre eix. Així s'obtingria un turisme amb tracció a les 4 rodes, millorant el control, estabilitat i seguretat respecte el vehicle propulsat només per un eix. No obstant això, afegir components intermedis en un transmissió d'energia porta implícita una pèrdua energètica, per la qual cosa els trens de potència amb tracció a les 4 rodes tenen una eficiència i autonomia menors. En concret, l'autonomia del tren de potència elèctric estudiat es redueix un 7,5% (370 km) en modificar el tren uniaxial per passar a ser 4x4.

El darrer tren de potència estudiat consisteix en situar els motors directament a les rodes per obtenir un augment de l'eficiència energètica. Així, s'eliminen les

---

<sup>3</sup> Rendiment aquí fa referència a l'aspecte tècnic, les especificacions i capacitats, no a l'eficiència energètica.

pèrdues energètiques ocasionades per les transmissions. Aquesta transmissió no té l'equivalent de combustió interna però es poden trobar alguns exemples de vehicles que utilitzen aquesta configuració, com el Mini QED o el Ford F-150 elèctric de *Protean Electric*.

Tot i que s'aconsegueix una millora de l'eficiència gairebé negligible (1%) respecte la disposició amb motor i eix motriu adjacents, aquesta configuració té avantatges significatius:

En primer lloc, es tracta d'un sistema de propulsió 4x4. Si es compara amb l'autonomia de la configuració 4x4 d'un sol motor, la disposició amb motors a roda aconsegueix un 11% més d'autonomia.

En segon lloc, com que es tracta d'un sistema parcialment redundant (tots els motors propulsen el vehicle) en cas de fallada d'un dels motors el vehicle pot seguir funcionant amb una potència reduïda.

Tanmateix, la disposició amb motors a roda té el gran desavantatge de la massa no suspesa, la qual dificulta el control del vehicle en carreteres amb irregularitats quan se circula a una velocitat prou elevada.

Finalment, si es tenen en compte les necessitats ambientals de reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle, s'hauria d'utilitzar una energia més neta per al transport. Per substituir el sistema actual dels turismes, s'han estudiat tres possibles trens de potència elèctrics, la valoració dels quals és:

La disposició amb motor i eix motriu adjacents té un rendiment<sup>4</sup> prou bo com per substituir el tren de potència dels vehicles de combustió interna convencionals. Per tant, es pot concloure que és el més adient per ser utilitzat en vehicles de propulsió elèctrica.

El tren de potència amb tracció a les 4 rodes és aplicable en vehicles que ho necessitin per les característiques de funcionament desitjades, però no és recomanable per les pèrdues energètiques que comporta.

La configuració amb motor a roda té diversos inconvenients (poca acceleració, massa no suspesa) que en fan difícil l'aplicació directa. Malgrat que no és impossible l'aplicació d'aquest tren de potència, caldria estudiar i resoldre les dificultats tècniques que presenta.

---

<sup>4</sup> novament, "rendiment" aquí s'utilitza en el sentit de capacitats tècniques. No es refereix únicament a l'eficiència energètica.

## 8. Bibliografia

---

[1] **Suspensió**

HARRIS, William. *How car suspensions work*. HowStuffWorks AUTO. Disponible a:

<<http://auto.howstuffworks.com/car-suspension.htm>>

[2] **Dimensions generals d'un turisme**

SAE International. *Motor Vehicle Dimensions*. Disponible a:

<<https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/005/sae.j1100.2001.html>>

[3] **Pes d'un turisme per parts**

MUBARAK, Mohamed. *Shedding the Extra Pounds: Weight Reduction Strategies for Fuel-efficient Cars*. Frost & Sullivan. Disponible a:

<<http://www.frost.com/prod/servlet/market-insight-print.pag?docid=166542046>>

[4] **Comparativa de bateries**

BUCHMANN, Isidor. *What's the best battery?* Battery University. Contingut basat en la publicació del mateix autor *Batteries in a Portable World – A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers* (4th edition). Disponible a:

<[http://batteryuniversity.com/learn/article/whats\\_the\\_best\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery)>

[5] **Cel·les de bateria d'ió liti de la sèrie 18650**

Fabricant Panasonic

<<http://www.batteryspace.com/hi-power-panasonic-lithium-18650-rechargeable-cell-3-6v-3400mah-12-24wh---ncr18650b-0-93---un-38-3-passed.aspx>>

<<https://industrial.panasonic.com/cdbs/ww-data/pdf2/ACI4000/ACI4000CE25.pdf>>

Fabricant LG

<[http://www.batteryspace.com/prod-specs/5702\\_5.pdf](http://www.batteryspace.com/prod-specs/5702_5.pdf)>

[6] **Tipus de motors elèctrics:**

MURPHY, Jim. *What's the difference between AC Induction, Permanent Magnet and Servomotor technologies?* Leeson Electric Corp., Motion System Design. Disponible a:

<<http://machinedesign.com/motorsdrives/whats-difference-between-ac-induction-permanent-magnet-and-servomotor-technologies>>

[7] **Motor síncron d'imants permanents**

SATO, Eiji. *Permanent Magnet Synchronous Motor Drives for Hybrid Electric Vehicles*. Wiley Interscience. Disponible a:

<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tee.20122/pdf>>

[8] GALCERAN, Samuel. *Apunts de Màquines Elèctriques*. Departament d'Enginyeria Elèctrica. UPC-ETSEIB

[9] LUPON, Emili. *Apunts d'Electrònica*, Departament d'Enginyeria Electrònica, UPC-ETSEIB

[10] **Dades consum combustible**

RETT, Allain. *Fuel economy versus mass*. Wired. Disponible a:  
<<http://www.wired.com/2012/08/fuel-economy-vs-mass/>>

[11] ERJAVEC, Jack. *Manual Transmissions*. Delmar Learning Tech One.

[12] CARDONA, Salvador i CLOS, Daniel. *Teoria de màquines*. Edicions UPC

[13] **Rendiments tècnics dels turismes**

Font: The Car Tech. *Car Performance Formulas*. Disponible a:  
[http://www.thecartech.com/subjects/auto\\_eng/car\\_performance\\_formulas.htm](http://www.thecartech.com/subjects/auto_eng/car_performance_formulas.htm)

[14] **Coeficients de fricció dels pneumàtics**

Font: Engineering Toolbox  
<[http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html)>

[15] **Dades Mercedes-Benz CLS 250d 4-Matic 2014**

Font: Automobile Catalog. Disponible a:  
<[http://www.automobile-catalog.com/car/2014/2070545/mercedes-benz\\_cls\\_250\\_bluetec\\_4matic.html](http://www.automobile-catalog.com/car/2014/2070545/mercedes-benz_cls_250_bluetec_4matic.html)>

[16] **Emissions de gasos d'efecte hivernacle**

Informe de l'associació nuclear mundial (World Nuclear Assossiation), *Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources*, (2011). Disponible a:  
<<http://www.world-nuclear.org/nuclear-basics/greenhouse-gas-emissions-avoided.aspx>>

## **Bibliografia complementària**

MEYWERK, Martin. *Vehicle Dynamics*. Wiley

MAINDONALD, John i BRAUN, John. *Data Analysis and Graphics Using R: An Example-based Approach*. Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics, p. 266-269.

### **Comparativa de vehicles EV i ICE**

GUSTAVSON, Tobias i JOHANSSON, Anders. *Comparison between Battery Electric Vehicles and Internal Combustion Engine Vehicles fueled by Electrofuels*. Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology. Disponible a:

<<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/218621/218621.pdf>>

### **Comportament dels conductors de vehicles elèctrics**

WU, Xinkai, FREESE, David, CABRERA, Alfredo, KITCH, William A. *Transportation research part D: Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation*. Part del llibre *Transportation Research*. Elsevier. Disponible a:

<[http://www.cpp.edu/~wakitch/arts/Wu\\_et\\_al\\_%282015%29.pdf](http://www.cpp.edu/~wakitch/arts/Wu_et_al_%282015%29.pdf)>

### **Bateria dels turismes Tesla**

HOWE, Nick. *Battery Pack*. Tesla Motors Wiki. Disponible a:

<[http://www.teslamotors.wiki/wiki/Battery\\_Pack](http://www.teslamotors.wiki/wiki/Battery_Pack)>

FABIO, Adam. *Tesla model S battery teardown*. Hackaday. Disponible a:

<<http://hackaday.com/2014/09/13/tesla-model-s-battery-teardown/>>

### **Autonomia i eficiència BMW i3**

KASPER, Rob. *Efficiency or range?* Blogspot de Tom Moloughney.

Disponible a:

<[http://bmwi3.blogspot.com.es/2014/08/guest-post-efficiency-or-range-you-cant\\_13.html](http://bmwi3.blogspot.com.es/2014/08/guest-post-efficiency-or-range-you-cant_13.html)>

### **Tesla Model S**

ROPER, David. *Tesla Model S*. Disponible a:

<<http://www.roperld.com/science/TeslaModelS.htm>>

### **Propietats físiques del combustible dièsel**

Font: The Physics Factbook, editat per: ELERT, Glenn. Disponible a:

<<http://hypertextbook.com/facts/2006/TatyanaNektalova.shtml>>

### **Minimitzar pèrdues d'energia**

JOACHIM, F. J., BÖRNER, J. i KURZ, N. *How to Minimize Power Losses in Transmissions, Axles and Steering Systems*. Gear Technology. Disponible a:

<<http://www.geartechnology.com/issues/0912x/minimize-power-losses.pdf>>

## 9. Annex

---

Les dades de consum de combustible de diferents vehicles i la seva massa, tal i com es mostren a la font [10], són:

model A = auto M = manual	city	highway	combined mpg		mass(kg)
Aston Marton DBS Coupe M-6	11	17	13	18,1	1695
Aston Marton V8 Vantage A-S6	13	19	15	15,7	1548
Aston Marton V8 Vantage M-6	12	19	14	16,8	1548
Audi R8 M-6	12	19	15	15,7	1560
Audi TT Roadster Quattro A-S6	21	29	24	9,8	1445,976
Cadillac XLR 4.4L A-S6	14	23	17	13,8	1725,93
Chevrolet Corvette 6.2L M-6	16	26	19	12,4	1519
Lamborghini Murcielago A-S6	9	14	11	21,4	1650
Mercedes Benz SL550 A-7	13	21	16	14,7	1911,66
Mercedes Benz SL600 A-5	11	18	14	16,8	2018,115
Mercedes Benz SL63 AMG A-S7	12	19	14	16,8	2007,243
Pontiac Solstice 2.0L A-5	19	27	21	11,2	1305
Saturn Sky 2.0L A-5	19	27	21	11,2	1330
Jaguar XK A-6	16	25	19	12,4	1662,963
Mini M-6	25	33	28	8,4	1208,604
Mitsubishi Eclipse M-5	19	26	22	10,7	1483
Audi A5 Quattro A-S6	17	26	20	11,8	1610
Chevrolet Aveo 5 A-4	25	34	28	8,4	1155
Chevrolet Cobalt M-5	22	30	25	9,4	1276,101
Chevrolet Cobalt XFE M-5	25	37	30	7,8	0
Ford Mustang 4.0L A-5	16	24	19	12,4	1519,815
Ford Mustang 5.4L A-5	14	20	16	14,7	1635,33
Mazda RX-8 M-6	16	22	18	13,1	1350
Nissan GT-R A-S6	16	21	18	13,1	1730
Pontiac G3 Wave 5 A-4	25	34	28	8,4	1150
Pontiac G3 Wave 5 M-5	27	34	30	7,8	1150
Pontiac G5 A-4	24	33	27	8,7	1248
Pontiac G5 M-5	25	35	29	8,1	1248
Pontiac G5 GT A-4	23	32	26	9	1286
Pontiac G5 GT M-5	23	32	26	9	1286
Scion tC A-4	21	29	24	9,8	1353,111
Scion tC M-5	20	27	23	10,2	1353,111
Volkswagen Eos A-S6	22	29	25	9,4	1589,124
Volkswagen Eos M-6	21	31	25	9,4	1589,124
Volkswagen New Beetle A-S6	20	29	23	10,2	1656,168
Volkswagen New Beetle M-5	20	28	23	10,2	1656,168
Volvo C70 Convertible A-S5	18	26	21	11,2	0
Volvo C70 Convertible M-6	18	27	21	11,2	1643,031
Acura TSX A-S5	21	30	25	9,4	1548,807
Acura TSX M-6	20	28	23	10,2	1548,807
Hyundai Accent A-4	26	35	29	8,1	1114,833
Hyundai Accent M-5	27	33	29	8,1	1114,833
Mazda 3 2.0L A-S5	22	30	25	9,4	1259,34

Mazda 3 2.0L M-5	24	32	27	8,7	1259,34
Mazda 3 2.3L A-S5	22	28	24	9,8	1307,358
Mazda 3 2.3L M-5	22	29	25	9,4	1307,358
Mercedes CLS63 AMG A-S7	12	18	14	16,8	1907,13
Mitsubishi Lancer 2.0L A-S6	17	25	20	11,8	1392,069
Mitsubishi Lancer 2.0L AV	22	28	24	9,8	1392,069
Pontiac G6 2.4L A-S6	22	33	26	9	1579,611
Pontiac G6 2.4L A-4	22	30	25	9,4	1579,611
Saturn Astra 2DR Hatchback A-4	24	30	27	8,7	1283,349
Saturn Astra 2DR Hatchback M-5	24	32	27	8,7	1283,349
Subaru Legacy AWD A-S4	20	26	22	10,7	1497,165
Toyota Corolla A-4	27	35	30	7,8	1233,519
Volkswagen GTI A-S6	22	29	25	9,4	1449,6
Volkswagen GTI M-6	21	31	25	9,4	1463,19
Volkswagen Jetta 2.0L A-S6	22	29	25	9,4	1463,19
Volkswagen Rabbit A-S6	21	29	24	9,8	1347,675
Volkswagen Rabbit M-5	21	29	24	9,8	1347,675
Volvo C30 2.4L FWD A-S5	20	28	23	10,2	1450,053
Volvo C30 2.4L FWD M-5	20	28	23	10,2	1450,053
Volvo S40 AWD A-S5	18	26	21	11,2	1400
Volvo S40 AWD M-6	17	25	20	11,8	1400
Buick Lacrosse/Allure 3.8L A-4	17	28	21	11,2	1737,255
Cadillac STS 3.6L A-S6	17	26	20	11,8	1776,666
Cadillac STS 4.4L A-S6	13	19	15	15,7	1925,25
Chevrolet Malibu 2.4L A-4	22	30	25	9,4	1577
Chevrolet Malibu 3.5L A-4	18	29	25	9,4	1577
Ford Fusion FWD A-5	20	28	23	10,2	1485,84
Ford Fusion FWD M-5	20	29	23	10,2	1485,84
Hyundai Elantra A-4	25	33	28	8,4	1144
Hyundai Elantra M-5	24	33	27	8,7	1144
KIA Optima A-5	22	32	25	9,4	1432
KIA Optima M-5	22	32	25	9,4	1432
KIA Spectra A-4	24	32	27	8,7	1253,451
KIA Spectra M-5	23	30	26	9	1253,451
Mazda 6 A-S5	21	30	24	9,8	1628
Mazda 6 M-6	20	29	23	10,2	1628
Mercury Milan A-5	20	28	23	10,2	1506,225
Mercury Milan M-5	20	29	23	10,2	1506,225
Mitsubishi Galant A-S4	20	27	23	10,2	1980
Mitsubishi Galant A-S5	16	25	19	12,4	1980
Nissan Maxima AV	19	26	22	10,7	1634,877
Nissan Versa AV	27	33	29	8,1	1219,929
Nissan Versa A-4	24	32	27	8,7	1219,929
Saturn Aura 2.4L A-S6	22	33	26	9	1560,132
Saturn Aura 3.6L A-S6	17	26	20	11,8	1560,132
Toyota Camry A-5	21	31	25	9,4	1498,071
Toyota Camry M-5	21	31	25	9,4	1498,071
Volkswagen Passat A-S6	19	29	23	10,2	1452,318
Volkswagen Passat M-6	21	31	25	9,4	1452,318
Chevrolet Impala 3.5L A-4	18	29	22	10,7	1613,586
Chevrolet Impala 5.3L A-4	16	24	19	12,4	1613,586



Lincoln MKS AWD A-6	16	23	19	12,4	1950,165
Lincoln MKS FWD A-6	17	24	19	12,4	1950,165
Pontiac G8 A-S5	17	25	20	11,8	1787,538
Toyota Matrix 1.8L A-4	25	31	28	8,4	1343,145
KIA Rondo A-4	20	27	22	10,7	1542,918
KIA Rondo A-5	18	26	21	11,2	1542,918
Chevrolet Colorado 3.7L 2WD A-4	17	23	19	12,4	1835,103
Chevrolet Colorado Crewcab 2.9L 2WD A-4	18	24	20	11,8	1835,103
Toyota Tacoma 2WD A-4	19	25	21	11,2	1882,215
Toyota Tacoma 2WD M-5	20	26	22	10,7	1882,215
Chevrolet Silverado C15 2WD A-4	14	20	16	14,7	2075,646
GMC Sierra C15 2WD A-4	14	20	16	14,7	2251,863
GMC Sierra C15 5.3L 2WD A-6	14	20	16	14,7	2206,563
Nissan Titan 2WD A-5	13	17	14	16,8	2389,122
Nissan Titan 2WD Gas FFV A-5	13	18	14	16,8	2389,122
Hummer H3T 4WD 3.7L A-4	14	18	16	14,7	2189,349
Chevrolet Van 1500 Cargo 2WD FFV Gas	14	18	15	15,7	2161,263
GMC Savanna 1500 AWD Cargo FFV Gas	14	17	15	15,7	2305,77
Hyundai Entourage A-5	16	23	18	13,1	2068,398
KIA Sedona A-5	16	23	18	13,1	1987,311
Mazda 5 A-S5	21	27	23	10,2	1574,175
Toyota Sienna 2WD A-5	17	23	19	12,4	1892,181
Buick Enclave FWD A-5	17	24	19	12,4	2165,34
Cadillac Escalade 2WD FFV Gas A-5	12	19	15	15,7	2585,724
Cadillac SRX 2WD A-S5	15	23	18	13,1	1913,472
Chevrolet Avalanche 1500 5.3L 2WD	14	20	16	14,7	2536,347
Chevrolet Equinox FWD A-5	17	24	20	11,8	1698,75
Chevrolet HHR FWD 2.0L A-4	19	29	23	10,2	1453,224
Chevrolet Tahoe 1500 FFV Gas 5.3L A-6	14	20	16	14,7	2539,971
Chevrolet Tahoe 1500 FFV E85 5.3L A-6	10	15	12	19,6	2385,045
Chevrolet Trailblazer 4.2L	14	20	16	14,7	2048,919
Ford Escape FWD 2.5L A-6	20	28	23	10,2	1540,2
Ford Flex FWD A-6	17	24	19	12,4	2187,084
GMC Acadia FWD A-6	17	24	19	12,4	2109,168
GMC Envoy 2WD 4.2L A-6	14	20	16	14,7	1961,943
GMC Yukon 1500 2WD A-6	14	20	16	14,7	2383,686
Honda Pilot 2WD A-5	17	23	19	12,4	1956,507
Hyundai Santa Fe 2WD A-4	18	24	20	11,8	1797,957
Jeep Commander 2WD A-5	15	20	16	14,7	2355,147
Jeep Grand Cherokee 2WD A-5	16	21	18	13,1	2215,623
KIA Borrego 2WD A-5	17	21	18	13,1	2174,4
Lexus RX 350 2WD A-S5	18	23	20	11,8	1753,11
Mazda CX-7 2WD A-S6	17	23	20	11,8	1779,837
Mitsubishi Outlander 2WD A-S6	17	24	20	11,8	1537,935
Nissan Armada 2WD A-5	12	18	14	16,8	2564,433

Pontiac Torrent FWD A-5	17	24	20	11,8	1657,98
Saturn Outlook FWD A-6	17	24	19	12,4	2163,981
Saturn Vue FWD A-4	19	26	22	10,7	1715,964
Toyota Highlander 2WD A-S5	18	24	20	11,8	2042,124
GMC Yukon Denali 1500 FFV Gas AWD A-6 6.2L	12	19	14	16,8	2576,211
Hummer H3 4WD A-4 3.7L	14	18	16	14,7	2212,452
Land Rover LR2 A-S6	15	22	17	13,8	1927,515

A partir de les dades subministrades pels fabricants de diversos turismes de categories i gammes diferents, tenint en compte el seu pes s'ha obtingut la següent recta de regressió que les aproxima.

La recta de regressió que s'ajusta a les dades és la següent:

$$e \text{ [mpg]} = -0,00971 \cdot m \text{ [kg]} + 38,47 \quad (\text{A.1})$$

Canviant les unitats a de mpg (milles/galó) a km/kWh, la recta queda:

$$\begin{aligned}
 \text{mpg} &\equiv \frac{\text{milles}}{\text{galó}} \cdot \frac{1 \text{ gal}}{3,785 \text{ L}} \cdot \frac{1,609 \text{ km}}{1 \text{ milla}} = \left[ \frac{\text{km}}{\text{L}} \right] \cdot \frac{1 \text{ L gasolina}}{34,2 \text{ MJ}} \cdot \frac{1 \text{ MJ}_{\text{usats}}}{\underbrace{0,25}_{\eta_{\text{motor CI}}} \text{ MJ}_{\text{propulsió}}} = \left[ \frac{\text{km}}{\text{MJ}} \right] \\
 &\rightarrow \left[ \frac{\text{km}}{\text{MJ}} \right] \cdot \frac{3,6 \text{ MJ}}{1 \text{ kWh}} = \left[ \frac{\text{km}}{\text{kWh}} \right] \quad \text{simplificant, } \text{mpg} \cdot 0,17899 = \text{km/kWh}
 \end{aligned}$$

Per ajustar la recta als valors que s'obtidrien en vehicles amb una resistència a l'aire baixa i optimitzats energèticament cal modificar la constant. A més, el rendiment dels vehicles amb motors de CI no és estrictament 0,25. En aquest cas, el valor de la constant s'estableix en 8,17. Aquesta modificació és congruent amb l'autonomia obtinguda per vehicles amb les característiques descrites.

$$e \text{ [km/kWh]} = -0,001738 \cdot m \text{ [kg]} + 8,17 \quad (\text{A.2})$$

L'equació de necessitats energètiques és la inversa:

$$c = \frac{1}{e} = \text{[kWh/km]} \quad (\text{A.3})$$